Plant Prod., 2026, 48(4), 527- 546
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48429.2233
Received: 21 November 2024
Accepted: 25 April 2025

Plant Productions

Research Article

Selection of drought-tolerant oilseed sunflower genotypes using the multi-trait genotype-ideotype index (MGIDI)

Nasrin Akbari[1*], Reza Darvishzadeh[2]

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

Citation: Akbari, N., Darvishzadeh, R. (2026). Selection of drought-tolerant oilseed sunflower genotypes using the multi-trait genotype-ideotype index (MGIDI). *Plant Productions*, 48(4), 527 – 546.

Abstract

Introduction
The multigenic and environmentally sensitive nature of drought tolerance presents significant challenges for the selection and breeding of superior genotypes in oilseed sunflower. Effective evaluation of drought tolerance relies on the simultaneous assessment of multiple traits across various environments, necessitating robust multi-trait selection methods.

Materials and Methods
The study evaluated 100 oilseed sunflower genotypes for 13 agronomic and physiological traits under both normal and limited irrigation (drought stress) conditions, employing a simple 10×10 lattice design during the 2013 and 2014 growing seasons in Qezeljeh village, Salmas. Drought stress was imposed at the 8-leaf stage using a class A evaporation pan: plots received irrigation after 90 mm (normal) or 10 mm (drought) of evaporation. The measured traits included plant height (cm), leaf length (cm), leaf width (cm), petiole length (cm), stem diameter (cm), head diameter (cm), number of leaves, greenness index (SPAD), days to flowering, days to maturity, relative water content, seed oil content, and seed yield per plant. The multi-trait genotype-ideotype distance index (MGIDI) was employed for selection, and data were analyzed using the metan package in R.

Results and Discussion
Multivariate analysis of variance revealed significant effects of environment, genotype and their interaction under both irrigation regimes, indicating broad genetic diversity. Factor analysis

* **Corresponding Author:** Nasrin Akbari
E-mail: nasrinakbari93@gmail.com

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

identified five principal factors (eigenvalues >1) under normal conditions, and four under drought, explaining 75% and 69.1% of total trait variation, respectively.
Under normal irrigation, the first factor (eigenvalue: 4.8) included leaf length, leaf width, petiole length, stem diameter, head diameter and seed yield. Subsequent factors were associated with relative water content, flowering and maturity timing, greenness index, leaf number, plant height, and oil content. Under drought stress, the first factor (eigenvalue: 4.45) comprised similar morphological and yield traits, with other factors grouping relative water content, phenological traits, oil content, leaf number, plant height, and greenness index.
Principal component analysis of genotype-by-environment interaction revealed three and four components (eigenvalues >1) under normal and drought stress, explaining 62.3 and 71.4% of the variation, respectively. Under normal conditions, the eigenvalues of the first three factors were 1.81, 1.07, and 1.03, respectively, and under drought stress conditions, the eigenvalues of the first four factors were 4.5, 2.24, 1.23, and 1.06, respectively. The MGIDI index identified five genotypes (254-ENSAT), (AS3232), (ENSAT699), (HA304), and (SDB1) exhibited the greatest genetic distance, indicating their potential for breeding drought-tolerant hybrids through heterosis.

Conclusion

The MGIDI provides a comprehensive approach for multi-trait selection and clustering of sunflower genotypes under both normal and drought conditions. The identification of genotypes with high genetic divergence offers valuable material for developing drought-tolerant hybrids, leveraging the benefits of heterosis for improved crop resilience.

Keywords: Drought stress, Genetic diversity, Multivariate analysis, Oilseed crops, Simultaneous selection

تولیدات گیاهی، ۱٤۰٤، ٤۸(٤)، ۵۲۷ - ۵٤٦
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48429.2233
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

گزینش ژنوتیپ‌های آفتابگردان دانه روغنی متحمل به تنش خشکی با استفاده از شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی (MGIDI)

نسرین اکبری[1*] ، رضا درویش‌زاده[2]

۱- دانش‌آموختهٔ دکتری، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

با توجه به ماهیت چند ژنی تحمل تنش خشکی و تأثیرپذیری آن از عوامل محیطی، انتخاب موفق ژرم‌پلاسم و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از چالش‌های اصلی برنامه‌های به‌نژادی برای تحمل به تنش خشکی است. ارزیابی صفت تحمل به تنش خشکی به‌طور غیر مستقیم از طریق چندین صفت که به طور همزمان در چندین محیط مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، انجام می‌گیرد. در این مطالعه ۱۰۰ ژنوتیپ آفتابگردان دانه روغنی از نظر ۱۳ صفت، تحت دو شرایط آبیاری بدون تنش و تنش خشکی در قالب طرح لاتیس ساده ۱۰×۱۰ با دو تکرار طی دو سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ در روستای قزلجه از توابع شهرستان سلماس ارزیابی شدند. جهت اعمال تنش در مرحلهٔ هشت برگی، از تشتک تبخیر کلاس A استفاده شد. آبیاری در شرایط بدون تنش پس از ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشک تبخیر و در شرایط محدودیت آبی پس از ۱۸۰ میلی‌لیتر تبخیر انجام گرفت. به منظور بهرمندی از روش انتخاب چندگانه، از شاخص انتخاب چند متغییره فاصله از ژنوتیپ ایده‌آل استفاده گردید. برای تجزیهٔ‌داده‌ها از نرم‌افزار R بسته metan استفاده شد. بر اساس نتایج تجزیه واریانس چند متغیره، اثرات اصلی محیط و ژنوتیپ و همچنین برهم‌کنش محیط × ژنوتیپ در هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی، معنی‌دار بود که حاکی از تنوع قابل توجه بین ژنوتیپ‌ها است. در تجزیه به مؤلفهٔ اثرات اصلی تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی ، به ترتیب پنج و چهار عامل، مقدار ویژه بیش از یک داشتند، و به ترتیب ۷۵ درصد و ٦۹/۱ درصد از تنوع کل صفات را توجیه نمودند. در شرایط بدون تنش در عامل اول با مقدار ویژه ٤/۸، صفات طول برگ، عرض برگ طول دمبرگ، قطر ساقه، قطر طبق و عملکرد دانه بیشترین تأثیر را داشتند. در عامل دوم با مقدار ویژه ۱/۷۳، صفات محتوای نسبی آب، صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی، در عامل سوم با مقدار ویژه ۱/۱۱، صفات محتوای کلروفیل، در عامل چهارم با مقدار ویژه ۱/۰۷، صفات تعداد برگ و ارتفاع گیاه و در عامل پنجم با مقدار ویژه ۱/۰۳، صفت محتوای روغن بیشترین تأثیر را داشتند. در شرایط تنش خشکی در عامل اول با مقدار ویژه ٤/٤۵، طول برگ، عرض برگ طول دمبرگ، قطر ساقه، قطر طبق و عملکرد دانه بیشترین تأثیر را داشتند. در عامل دوم با مقدار ویژه ۲/۲٤، صفت محتوای نسبی آب، صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی، عامل سوم با مقادیر ویژه ۱/۲۳، صفات تعداد برگ، ارتفاع گیاه، محتوای روغن دانه و عامل چهارم با مقادیر ویژه ۱/۰٦ صفات کلروفیل، محتوای روغن

* **نویسنده مسئول:** نسرین اکبری
رایانامه: nasrinakbari93@gmail.com

بیشترین تأثیر را داشتند. در تجزیه به مؤلفهٔ برهم‌کنش تحت شرایط بدون تنش و تنش به ترتیب سه و چهار عامل مقدار ویژه بیش از یک داشتند و این عوامل به ترتیب ٦٢/٣ و ٧١/٤ درصد از تنوع کل صفات را توجیه نمودند. در شرایط بدون تنش مقادیر ویژه سه عامل اول به ترتیب ۵/۱۲، ۱/٦٩ و ۱/۲۹ و در شرایط تنش مقادیر ویژه چهار عامل اول به ترتیب برابر ۵/۱۱، ۱/۹۳، ۱/۲۳ و ۱/۰۱ بود. بر پایهٔ نتایج شاخص چند متغیره MGIDI پنج ژنوتیپ، (ENSAT-254)، (AS3232)، (ENSAT699)، (HA304) و (SDB1) تحت هر دو شرایط جزو ژنوتیپ‌های مطلوب ارزیابی شدند. از ژنوتیپ‌های برتر معرفی‌شده می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی تهیه ارقام متحمل به تنش خشکی استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: تجزیه واریانس چند متغیره، تنش کم‌آبی، تنوع ژنتیکی، گزینش همزمان، گیاهان دانه‌روغنی

مقدمه

تنش خشکی یکی از عوامل مهم غیرزیستی مؤثر بر کاهش عملکرد محصولات زراعی است که به طور قابل توجه بر رشد و تولید محصولات تاثیر می‌گذارد (Shen *et al*., 2023). خشکی باعث افزایش تعرق و کاهش دسترسی به آب توسط ریشه گیاهان می‌شود (Anjum *et al*., 2011).

با توجه به تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و کاهش منابع موجود، جهت مقابله با چالش امنیت غذایی در جهان نیاز به‌کارگیری رویکردهای پیچیده‌ای برای حفظ بهره‌وری محصولات است. در این شرایط آفتابگردان به عنوان منبعی غنی از روغن خوراکی و پروتئین، می‌تواند نقش حیاتی در پُرکردن شکاف موجود در تولید روغن و پروتئین خوراکی در جهان داشته باشد (Hussain *et al*., 2018).

آفتابگردان یکی از محصولات مهم دانه روغنی است که سهم هشت درصدی در تولید دانه‌های روغنی جهان را دارد (Hussain *et al*., 2018). اگرچه این محصول نسبتاً متحمل به خشکی است، با وجود این پاسخ به تنش خشکی و سطح تحمل در آفتابگردان مانند دیگر گیاهان بسته به ژنوتیپ گیاهی و مراحل رشد یکسان نیست (Hussain *et al*., 2018; Omidinasab *et al*., 2023; Shi *et al*., 2023). قرار گرفتن در معرض خشکی بر برخی از تغییرات چرخهٔ رشدی مانند جوانه‌زنی، گرده‌افشانی و پُر شدن آکنه تاثیر گذاشته و می‌تواند باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد آفتابگردان شود و به طور کلی خشکی شدید عامل مهم کاهش تولید دانه و روغن محسوب می‌شود (Hussain *et al*., 2018; Omidinasab *et al*., 2024).

با توجه به ماهیت چندژنی تحمل تنش خشکی و تأثیرپذیری صفت از محیط؛ انتخاب موفق مادهٔ ژنتیکی و شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از چالش‌اصلی برنامه‌های به‌نژادی است (Enyew *et al*., 2021). برخلاف دیگر صفات چند-ژنی همچون عملکرد که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری است؛ ارزیابی صفت تحمل تنش خشکی به‌طور غیر مستقیم از طریق صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک مرتبط با تحمل انجام می‌گیرد. در این راستا استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره برای طبقه‌بندی مادهٔ ژنتیکی و بررسی روابط ژنتیکی بین مواد اصلاحی به‌عنوان یک راهبرد جدید مطرح است (Farahani and Arzani, 2009). از روش-های چند متغیره متداول می‌توان به تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تحلیل عاملی و تجزیه خوشه‌ای اشاره کرد. شاخص چند-صفتی فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ[1] (MGIDI) یکی از جدیدترین روش‌های چند متغیره مبتنی بر تجزیه به عامل‌ها و فاصله از ژنوتیپ-ایده‌آل، جهت شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب با در نظر گرفتن چندین صفت است (Shirzad *et al*., 2023; Benakanahalli *et al*., 2021; Olivoto and Nardino, 2020). در این روش ژنوتیپ‌ها بر اساس مجموعه عوامل حاصل از تجزیه عاملی دسته‌بندی می‌شوند و اطلاعات صفات ارزیابی و نقاط قوت و ضعف هر ژنوتیپ مشخص می‌گردد (Olivoto *et al*., 2022). هدف اصلی، شناسایی ژنوتیپ‌هایی است که نمود بهتری برای اکثر صفات مورد مطالعه ارائه می‌دهند (Olivoto *et al*., 2022). نکتهٔ کلیدی در زمینهٔ استفاده از MGIDI انتخاب یک ژنوتیپ

1- Multitrait Genotype Ideotype Distance Index

ایده‌آل است. سپس باید مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی مورد استفاده شناسایی شوند، که قطعاً بسته به هدف اصلاحی مطالعه متفاوت خواهد بود (Olivoto *et al*., 2022). از این روش در گوار (*Cyamopsis tetragonoloba*) (Benakanahalli *et al*., 2021)، گندم (Pour-Aboughadareh and Poczai, 2021; Askari Kalestani *et al*., 2025)، جو (Shirzad *et al*., 2023) و توت‌فرنگی (Olivoto *et al*., 2022) استفاده شده است. این مطالعه به‌منظور انتخاب ژنوتیپ‌های آفتابگردان دانه روغنی متحمل به تنش خشکی بر اساس مجموعه صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک از طریق شاخص چند متغیره MGIDI انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۱۰۰ ژنوتیپ آفتابگردان دانه روغنی که از مراکز تحقیقاتی مختلف جهان (جدول ۱) تهیه شده‌اند در دو آزمایش جداگانه، آبیاری بدون تنش و محدود (تنش خشکی)، در قالب طرح لاتیس ساده ۱۰×۱۰ در روستای قزلجه شهرستان سلماس با موقعیت جغرافیایی ۳۸ درجه ۱۱ دقیقه و ۵۰ ثانیه شمالی و ۴۴ درجه و ۴۵ دقیقه و ۵۵ ثانیه شرقی طی دو سال (۱۳۹۲ و ۱۳۹۳) و در ۲ تکرار کشت شدند. با توجه به گزارش‌های آب و هوایی، این روستا دارای میزان متوسط بارندگی سالیانهٔ ۳۸۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (http://en.climate-data.org/location/1784/). کشت در خطوط به طول پنج متر با فاصلهٔ ۶۰ سانتی‌متر بین خطوط و ۵۰ سانتی‌متر روی خطوط کشت انجام شد. ملاک برای آبیاری تا مرحلهٔ هشت برگی پس از ۹۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک کلاس A در هر دو سال، در هر دو آزمایش آبیاری بدون تنش و آبیاری محدود بود. از مرحلهٔ هشت برگی، آبیاری آزمایش آبیاری بدون تنش تا انتهای فصل رشد به همین منوال ادامه یافت. اما در آزمایش آبیاری محدود، از این مرحله به بعد، ملاک برای آبیاری، ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A در نظر گرفته شد. با توجه به پیشینه اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش و عدم بارندگی در محدوده زمانی فوق تمهیدات خاصی در این راستا انجام نپذیرفت. پس از گلدهی صفات ارتفاع بوته (سانتی‌متر)، طول برگ (سانتی‌متر)، عرض برگ (سانتی‌متر)، طول دمبرگ (سانتی‌متر)، قطر ساقه (سانتی‌متر)، قطر طبق (سانتی‌متر)، تعداد برگ، شاخص سبزینگی (عدد SPAD)، روز تا گلدهی (روز)، روز تا رسیدگی (روز)، محتوای نسبی آب برگ (درصد)، محتوای روغن دانه (درصد) و عملکرد دانه (گرم در بوته) اندازه‌گیری شدند.

اولین گام برای محاسبه شاخص MGIDI، تغییر مقیاس ماتریس داده (X_{ij}) که یک جدول دو طرفه با i ردیف یا ژنوتیپ و j ستون یا صفت است؛ به‌طوری که همه مقادیر در محدوده ۰–۱۰۰ قرار گیرند (Olivoto *et al*., 2019). تغییر مقیاس برای صفت jام از iامین ژنوتیپ (rX_{ij}) با معادله زیر حاصل گردید.

$$rX_{ij} = \frac{\eta_{nj} - \varphi_{nj}}{\eta_{oj} - \varphi_{oj}} \times \left(\theta_{ij} - \eta_{oj}\right) + \eta_{nj}$$

در این معادله η_{nj} و φ_{nj} به ترتیب مقادیر جدید حداکثر و حداقل برای صفت jام پس از تغییر مقیاس و η_{oj} و φ_{oj} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل اصلی برای صفت jام هستند. θ_{ij} مقدار اصلی برای صفت jام برای ژنوتیپiام است. مقادیر η_{nj} و φ_{nj} برای صفاتی که در آنها مقادیر کمتر مورد نظر است، صفر $= \eta_{nj}$ و ۱۰۰ $= \varphi_{nj}$ و برای صفاتی که در آنها مقدار بالاتر مورد نظر است ۱۰۰ $= \eta_{nj}$ و صفر $= \varphi_{nj}$ در نظر گرفته شد. هر ستون ماتریس تغییر یافته rX_{ij} دارای محدوده ۱۰۰–۰ است که هدف انتخاب (افزایش یا کاهش) را در نظر می‌گیرد و ساختار همبستگی مجموعه اصلی را حفظ می‌کند. مرحله دوم تحلیل عاملی اکتشافی برای گروه‌بندی صفات همبسته به عوامل و سپس تخمین نمرات فاکتوریل برای هر ژنوتیپ است. تحلیل عاملی بر اساس معادله زیر انجام گرفت.

$$X = \mu + Lf + \varepsilon$$

که در آن X بردار مشاهدات p×۱، μ بردار میانگین p×۱ استاندارد شده و L ماتریس p×f از بارهای عاملی است. f بردار عوامل مشترک p×۱ و ε بردار باقیمانده p×۱ است. p و f به ترتیب تعداد صفات و عوامل مشترک نگه-

داشته شده است. مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از ماتریس همبستگی جدول دو طرفه rX به دست آمدند. بارهای اولیه تنها با در نظر گرفتن عامل‌هایی با مقادیر ویژه بیشتر از یک به دست آمد. معیار چرخش واریماکس (Kaiser, 1958) برای چرخش تحلیلی[1] و تخمین بارهای نهایی[2] استفاده شد. امتیازات برای ژنوتیپ‌ها بر اساس رابطه زیر به دست آمد.

$$F = Z\left(A^{T}R^{-1}\right)^{T}$$

که در آن F ماتریس g×f نمرات عامل‌ها، Z ماتریس g×p میانگین استاندارد (rX)، A ماتریس p×f بارهای متعارف و R ماتریس همبستگی p×p بین صفات است. g، f و p به ترتیب نشان دهنده تعداد ژنوتیپ‌ها، عامل‌های باقی مانده (عامل‌های با مقادیر ویژه بیش از یک) و صفات مورد تجزیه و تحلیل است.

سومین مرحله از محاسبات MGIDI برنامه‌ریزی ایدئوتیپ بود. طبق تعریف $rX_{ij} = \frac{\eta_{nj} - \varphi_{nj}}{\eta_{oj} - \varphi_{oj}} \times \left(\theta_{ij} - \eta_{oj}\right) + \eta_{nj}$ ایدئوتیپ دارای بالاترین مقدار تغییر مقیاس (۱۰۰) برای همه صفات مورد تجزیه و تحلیل است. بنابراین، ایدئوتیپ با یک بردار p × ۱ به صورت $I = \left[\text{صد} \cdots \text{صد،صد،}\right]$ تعریف شد. نمرات ایدئوتیپ نیز بر اساس رابطه $F = Z\left(A^{T}R^{-1}\right)^{T}$ برآورد شد. چهارمین و آخرین مرحله، برآورد فاصله چند صفتی ژنوتیپ–ایدئوتیپ شاخص (MGIDI) بر اساس معادله زیر بود.

$$MGIDI_{i} = \left[\sum_{j=1}^{f}\left(\gamma_{ij} - \gamma_{j}\right)^{2}\right]^{0/5}$$

که در آن MGIDIi شاخص فاصله ژنوتیپ–ایدئوتیپ چند صفتی برای ژنوتیپ iام است. γ_{ij} امتیاز ژنوتیپ iام در فاکتور jام $\left(i = 1،2 ،\cdots ،g;\ \ j = 1،2،\cdots ،f\right)$، g و f تعداد ژنوتیپ‌ها و فاکتورها و γ_{j} نمره jام ایدئوتیپ است. ژنوتیپ با کمترین MGIDI به ایدئوتیپ نزدیکتر است و بنابراین مقدار مورد نظر را برای تمام صفات مورد تجزیه و تحلیل ارائه می‌دهد. نسبت شاخص MGIDI iامین ژنوتیپ با jامین عامل با رابطه زیر محاسبه شد.

$$\omega_{ij} = \frac{\sqrt{D_{ij}^{2}}}{\sum_{j=1}^{f}\sqrt{D_{ij}^{2}}}$$

که در آن Dij فاصله بین iامین ژنوتیپ و ایدئوتیپ برای j-امین عامل است. برای یک ژنوتیپ، عوامل با سهم کم نشان می‌دهد که چنین ژنوتیپی برای صفات درون آن عامل به ایدئوتیپ نزدیک است.

تجزیه واریانس چند متغیره و محاسبهٔ شاخص MGIDI در قالب مدل آماری طرح با نرم‌افزار R بسته metan انجام شد (Olivoto *et al.*, 2022). بسته آماری metan نتایج تجزیه را فقط با آماره پیلای ارایه می‌کند.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس چند متغیره، اثرات اصلی محیط و ژنوتیپ، همچنین برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط در هر یک از شرایط ن بدون تنش و تنش خشکی معنی‌دار بود (جدول ۲ و ۳). اختلاف معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها حاکی از تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها در هر یک از شرایط بدون تنش و تنش خشکی است. معنی‌دار بودن برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط نشان می‌دهد واکنش ژنوتیپ‌ها از محیطی به محیط دیگر متفاوت می‌باشد.

1- Analytic rotation
2- End or final loadings

جدول ۱- کد شناسایی و منشأ ۱۰۰ ژنوتیپ آفتابگردان روغنی مورد مطالعه در شرایط نرمال و تنش خشکی

Table 1. Identification code and origin of 100 oilseed sunflower genotypes studied under normal and drought stress conditions

Code	Genotype name	Country name	Name of the research center	Code	Genotype name	Country name	Name of the research center
1	H100A/83HR4	France	ASGROW	51	H250A/83HR4	France	ASGROW
2	H209A/LC1064	France	ASGROW	52	RHA265	U.S.A	USDA
3	H205A/H543R	France	ASGROW	53	PM1-3	U.S.A	USDA
4	AS5306	France	ENSAT	54	RT948	France	RUSTICA
5	RHA858	U.S.A	USDA	55	283-ENSAT		-
6	H209A/83HR4	France	ASGROW	56	QHP-1	France	INRAMONT
7	AS3211	France	ENSAT	57	SDR19	U.S.A	USDA
8	254-ENSAT	France	ENSAT	58	HA337B	U.S.A	USDA
9	AS5304	France	ASGROW	59	H100B	France	ASGROW
10	1009329.2(100K)	France	ENSAT	60	B454/03	Hungary	-
11	270-ENSAT	France	ENSAT	61	HA304	U.S.A	USDA
12	AS613	France	ASGROW	62	RT931	France	RUSTICA
13	A-FLPOPA	France	NOVARTIS	63	HA335B	U.S.A	USDA
14	OES	France	INRAMONT	64	NS_B5	France	NOVARTIS
15	H100A/LC1064	France	ASGROW	65	SDB3	U.S.A	USDA
16	RHA266	U.S.A	USDA	66	LC1064C	France	ASGROW
17	PAC2	France	ENSAT	67	NS-R5	France	NOVARTIS
18	H157/LC1064	France	ASGROW	68	DM-2	U.S.A	USDA
19	5DES20QR	France	BRN	69	H156A/RHA274	France	ASGROW
20	15038	France	ENSAT	70	SDB1	U.S.A	USDA
21	1009337(100K)	France	ENSAT	71	HAR-4	U.S.A	USDA
22	AS3232	France	ASGROW	72	AS5305	France	ASGROW
23	12AASB3	France	ASGROW	73	RHA274	U.S.A	USDA
24	8ASB2	France	ASGROW	74	H158A/H543R	France	ASGROW
25	9CSA3	France	Caussade semences	75	H100A/RHA274	France	ASGROW
26	H049+FSB	France		76	H209A/H566R	France	ASGROW
27	SSD-580	France	ASGROW	77	ASO-1-POP-A	France	ENSAT
28	5AS-F1/A2*R5AS-F1/A2*R2	France	ASGROW	78	AS6305	France	ENSAT
29	7CR1=PRH6	France	C.F	79	B-FIPOPB	France	NOVARTIS
30	ENSAT699	France	ENSAT	80	D34	U.S.A	USDA
31	SSD-581	France	ASGROW	81	CAY	France	ENSAT
32	TMB-51	France	INRAMONT	82	346	Iran	SPII
33	11*12	Iran	SPII	83	$NS\text{-}F_1\text{-}A_5*R_5$	France	NOVARTIS
34	110	Iran	SPII	84	36	Iran	SPII
35	H603R	France	INRAMONT	85	38	Iran	SPII
36	4	Iran	SPII	86	SDB2	France	INRAMONT
37	703-CHLORINA	France	ENSAT	87	H158A/LC1064		
38	$NSF_1\text{-}A_4*R_5$	France	NOVARTIS	88	H156A/H543R	France	ASGROW
39	28	Iran	SPII	89	H543R/H543R	France	ASGROW
40	30	Iran	SPII	90	H543R	France	-
41	F1250/03	Hungary		91	SF076	France	ENSAT
42	SDR18	U.S.A	USDA	92	B-FIPOPB		
43	LP-SCYB	France	ENSAT	93	SF085	France	ENSAT
44	803-1	Serbia	IFVC	94	SF092		-
45	1009370-1(100K)	France	ENSAT	95	A-CONTROLPLASTIPIC		
46	CSWW2S	France	Caussade semences	96	59-1	Iran	SPII
47	1009370-3(100K)	France	ENSAT	97	H-100A-90RL8		
48	H158A/H543R	France	ASGROW	98	SF109	France	ENSAT
49	H100A	France	ASGROW	99	SF105	France	ENSAT
50	15031	France	ASGROW	100	SF-023		-

جدول ۲- تجزیه واریانس چند متغیره برای ژنوتیپ‌های آفتابگردان روغنی در شرایط نرمال

Table 2. Multivariate analysis of variance for oilseed sunflower genotypes under normal conditions

Sources of variation	Df	Pillai test	Approximate F value	DF_N	DF_D	Pr(>F)
Environment	1	0.927	147.42	13	150	2.2 e-16***
Block/Rep/Environment	36	2.867	1.27	468	2106	2.2 e-16***
Rep/Environment	2	0.932	10.14	26	302	2.2 e-16***
Genotype	99	8.389	2.98	1287	2106	2.2 e-16***
Genotype/ Environment	99	6.767	1.78	1287	2106	2.2 e-16***
Residual	162					0.00029

ns، *، **، ***: به ترتیب غیر معنی‌دار؛ معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱.

ns, *, **, ***: non-significant, significant at the probability level of 0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

جدول ۳- تجزیه واریانس چند متغیره برای ژنوتیپ‌های آفتابگردان روغنی تحت تنش خشکی

Table 3. Multivariate analysis of variance for oilseed sunflower genotypes under drought stress

S.O.V	Df	Pillai test	Approximate F value	DF_N	DF_D	Pr(>F)
Environment	1	0.936	167.578	13	150	2.2 e-16***
Block/Rep/Environment	36	3.381	1.582	468	2106	2.2 e-16***
Rep/Environment	2	0.742	6.843	26	302	2.2 e-16***
Genotype	99	8.348	2.936	1287	2106	2.2 e-16***
Genotype/ Environment	99	6.863	1.830	1287	2106	2.2 e-16***
Residual	162					1.338-e11

ns، *، **، ***: به ترتیب غیر معنی‌دار؛ معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱.

ns, *, **, ***: non-significant, significant at the probability level of 0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

تحلیل عاملی اثرات اصلی ژنوتیپ

در تحلیل عاملیِ اثرات اصلی ژنوتیپ بر اساس ۱۳ صفت مورفولوژیک، تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی به ترتیب پنج و چهار عامل مقدار ویژه بیشتر از یک داشتند. این عوامل به ترتیب تحت شرایط بدون تنش و تنش ۷۵ درصد و ۶۹/۱ درصد از تنوع کل صفات را توجیه نمودند (جدول ۴). در مطالعه‌ای که به‌منظورگزینش برای سازگاری با ۱۵ ژنوتیپ آفتابگردان بر اساس صفت عملکرد انجام شد، سه عامل که مقادیر بیش از یک داشتند، در مجموع ۷۵/۲ درصد از تغییرات را توجیه کردند (Baraki *et al.*, 2024). تحت شرایط بدون تنش در عامل اول با مقدار ویژه ۴/۸ که بیشترین میزان تغییرات کل (۳۶/۹ درصد) را توجیه می‌کند، صفات عرض برگ، طول برگ، قطر ساقه، عملکرد، قطر طبق و طول دمبرگ با علامت منفی بیشترین تأثیر را داشتند. در عامل دوم با مقدار ویژه ۱/۷۳ که حدود ۱۳/۳ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کند، محتوای نسبی آب با علامت مثبت و صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی با علامت منفی بیشترین تأثیر را دارند. در عامل سوم با مقدار ویژه ۱/۱۱ که ۸/۵۴ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کند، شاخص سبزینگی با علامت منفی بیشترین تأثیر را داشت. در عامل چهارم با مقدار ویژه ۱/۰۷ که ۸/۲۵ درصد تغییرات کل را توجیه می‌کند، صفات ترتیب تعداد برگ و ارتفاع گیاه بیشترین تأثیر را دارند. در عامل پنجم با مقدار ویژه ۱/۰۳، که حدود و ۷/۹۴ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌کند، صفت

محتوای روغن بیشترین تأثیر را دارد (جدول ۴). در شرایط تنش خشکی در عامل اول با مقدار ویژه ۴/۴۵ و درصد توجیه تغییرات برابر با ۳۴/۳ درصد صفات عرض برگ، قطر ساقه، قطر طبق، طول برگ و عملکرد با علامت منفی بیشترین تأثیر را دارند. در عامل دوم با مقدار ویژه ۲/۲۴ و درصد توجیه تغییرات برابر با ۱۷/۲ درصد، صفت محتوای نسبی آب با علامت مثبت و صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی با علامت منفی بیشترین تأثیر را دارند. در این شرایط عامل سوم با مقادیر ویژه ۱/۲۳ و چهارم با مقادیر ویژه ۱/۰۶ به ترتیب ۹/۴۶ درصد و ۸/۱۸ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌نمایند (جدول ۴). از شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی جهت گزینش برای زودرسی و عملکرد بالا در برنج استفاده شده است (Pallavi, *et al.*, 2024). همچنین از شاخص فاصله ژنوتیپ-ایدئوتیپ چند صفتی برای انتخاب ۱۲ ژنوتیپ برنج از ۵۰ ژنوتیپ با در نظر گرفتن ۸ صفت که در ۴ عامل طبقه‌بندی شدند استفاده شد (Sholehah *et al.*, 2024) در مطالعه‌ای دیگر ۳۳ ژنوتیپ از ۷۵ ژنوتیپ ذرت بر اساس عملکرد دانهٔ آن‌ها در شرایط بهینه، تنش خشکی و غرقابی انتخاب گردیدند. در این مطالعه در ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط بهینه صفات در ۳ عامل و در ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط خشکی و غرقابی در ۴ عامل دسته‌بندی شدند (Singamsetti *et al.*, 2023). در برنامه‌های به‌نژادی انتخاب ژنوتیپ‌های برتر اهمیت ویژه‌ای دارد (Enyew *et al.*, 2021) و اطمینان از صحت انتخاب مهم است. بنابراین در نظر گرفتن دیفرانسیل انتخاب که یک مفهوم اساسی در به‌نژادی گیاهی است و قدرت انتخاب اعمال‌شده بر یک جمعیت را اندازه‌گیری می‌کند، بسیار مهم است. دیفرانسیل انتخاب تفاوت بین میانگین ارزش فنوتیپی افراد انتخاب‌شده (والدین انتخاب‌شده برای نسل بعد) و میانگین ارزش فنوتیپی کل جمعیت اصلی است. باتوجه به جدول ۵ و ۶ دیفرانسیل گزینش برای همه صفات تحت شرایط بدون تنش مثبت و بیشترین و کمترین درصد مقادیر به ترتیب در صفات عملکرد (۴۰/۵ درصد) و محتوای روغن (۱/۰۵ درصد) مشاهده شد. تحت شرایط تنش خشکی، به جز محتوای نسبی آب برگ که دارای دیفرانسیل گزینش نامطلوب (۰/۹۱۰-) بود همه صفات دیفرانسیل گزینش مثبت داشتند. در این شرایط درصد دیفرانسیل گزینش برای صفات بین ۱۹/۱ درصد برای صفت تعداد برگ تا ۱/۴۶- درصد برای صفت محتوای نسبی آب برگ متغیر بود (جدول ۶). در مطالعه دیگر در آفتابگران که با استفاده از شاخص چند صفتی MGIDI به‌منظور گزینش برای سازگاری و عملکرد بالا انجام شد، دیفرانسیل گزینش برای صفات روز گلدهی، روز رسیدگی و ارتفاع بوته منفی گزارش شد. اما برای عملکرد درصد دیفرانسیل گزینش مثبت و ۱۶/۵ درصد بود (Baraki *et al.*, 2024)

جدول ٤- ضرایب صفات در عامل‌های با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر اصلی ژنوتیپ در ژنوتیپ‌های آفتابگردان روغنی تحت شرایط نرمال و تنش خشکی

Table 4. Coefficient of traits in factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype main effect in oilseed sunflower genotypes under normal and drought stress conditions

Traits	Normal							Drought stress						
	Uniquenesses	Communality	Loading factor					Uniquenesses	Communality	Loading factor				
			1	2	3	4	5			1	2	3	4	
Leaf length (cm)	0.18	0.82	-0.82	-0.23	0.16	0.25	0.07	0.19	0.81	-0.83	-0.24	0.24	-0.03	
Leaf width (cm)	0.17	0.83	-0.86	-0.09	0.07	0.25	-0.1	0.2	0.8	-0.87	-0.11	0.17	0	
Petiole length (cm)	0.4	0.6	-0.71	-0.22	0.14	0.04	0.13	0.52	0.48	-0.56	-0.31	0.14	0.22	
Number of leaf	0.15	0.85	-0.07	-0.03	-0.05	0.92	0.01	0.28	0.72	-0.09	-0.13	0.82	0.16	
Stem diameter (cm)	0.27	0.73	-0.82	-0.01	0.03	0.2	-0.14	0.24	0.76	-0.85	-0.05	0.18	0.08	
Head diameter (cm)	0.36	0.64	-0.74	-0.1	-0.22	-0.08	0.18	0.22	0.78	-0.87	0.06	-0.12	-0.05	
Plant height (cm)	0.35	0.65	-0.48	-0.25	0	0.6	0.1	0.43	0.57	-0.47	-0.16	0.48	0.3	
Greenness index (SPAD)	0.23	0.77	0.01	-0.11	-0.87	0.03	-0.01	0.31	0.69	-0.01	-0.02	0.11	0.82	
Day to flowering (day)	0.17	0.83	-0.19	-0.83	-0.28	0.15	0.06	0.21	0.79	-0.07	-0.85	0.18	0.18	
Day to maturity (day)	0.21	0.79	-0.22	-0.79	-0.24	0.2	-0.04	0.23	0.77	-0.1	-0.85	0.15	0.14	
RWC (%)	0.42	0.58	-0.02	0.69	-0.29	0.1	0.02	0.53	0.47	-0.02	0.61	0.2	0.22	
Oil content (%)	0.04	0.96	-0.06	0.01	0.01	0.05	0.98	0.38	0.62	-0.01	0.14	0.59	-0.5	
Seed yield (gr-plant)	0.29	0.71	-0.78	0.05	-0.3	-0.01	0.06	0.25	0.75	-0.79	0.29	-0.19	-0.06	
Eigenvalues			4.8	1.73	1.11	1.07	1.03			4.45	2.24	1.23	1.06	
Percentage of explained variance			36.9	13.3	8.54	8.25	7.94			34.3	17.2	9.46	8.18	
Percentage of cumulative explained variance			36.9	50.2	58.8	67	75			34.3	51.5	61	69.1	

جدول ۵- اجزای پنج عامل با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر اصلی ژنوتیپ در آفتابگردان روغنی در شرایط عادی

Table 5. Components of five factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype main effect in oilseed sunflower under normal conditions

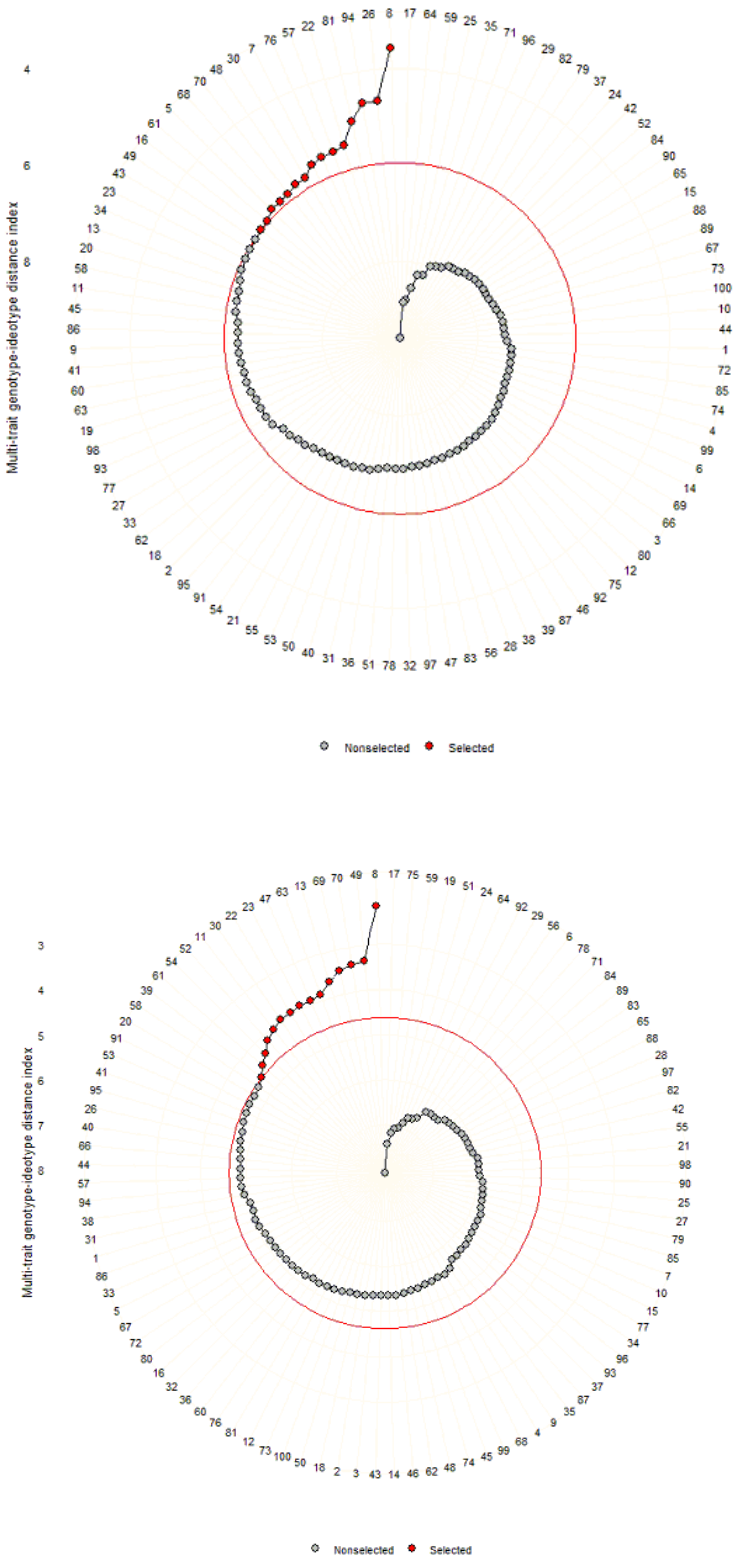
Traits	Factor	Total average	Average of selected genotypes	Differential selection	Selection differential percentage
Leaf length (cm)	1	16.6	18.2	1.64	9.89
Leaf width (cm)	1	14.3	16	1.74	12.2
Petiole length (cm)	1	9.29	10	0.756	8.14
Stem diameter (cm)	1	4.78	5.39	0.616	12.9
Head diameter (cm)	1	13.3	15.2	1.94	14.6
Seed yield (gr-plant)	1	41.8	58.7	16.9	40.5
Day to flowering (day)	2	74.5	76.7	2.15	2.89
Day to maturity (day)	2	107	110	2.81	2.62
RWC (%)	2	71.3	72.3	0.986	1.38
Greenness index (SPAD)	3	38.6	41.7	3.09	7.99
Plant height (cm)	4	109	122	13.5	12.4
Number of leaf	4	17	18.7	1.68	9.85
Oil content (%)	5	47.3	47.8	0.498	1.05

شاخص گزینش چند متغیره MGIDI برای هر یک از ژنوتیپ‌های آفتابگردان دانه روغنی در هریک از شرایط بدون تنش و تنش خشکی بر اساس نتایج تجزیه به عامل‌ها و امتیازدهی بر پایه بیشتر بودن همه صفات مورد بررسی انجام گرفت و بر اساس نتایج رتبه‌بندی با شاخص (شکل ۱) تحت شرایط بدون تنش به ترتیب ۱۵ ژنوتیپ شامل ژنوتیپ‌های (254-ENSAT)، (H049+FSB)، (SF092)، (CAY)، (AS3232)، (SDR19)، (H209A/H566R)، (As3211)، (ENSAT699)، (H158A/H543R)، (SDB1)، (DM-2)، (RHA858)، (HA304)، (RHA266) و تحت شرایط تنش خشکی ۱۵ ژنوتیپ شامل ژنوتیپ‌های شماره (254-ENSAT)، (H100A)، (SDB1)، (H156A/RHA274)، (A-FLPOPA)، (HA335B)، (100937-3(100K))، (12AASB3)، (AS3232)، (ENSAT699)، (270–ENSAT)، (RHA265)، (RT948)، (HA304) و (ایرانی ۲۸) جز ژنوتیپ‌های مطلوب ارزیابی شدند. ژنوتیپ‌های انتخاب-شده در مجموع صفات از بیشترین مقادیر برخوردار می-باشند. پنج ژنوتیپ شامل ژنوتیپ‌های (254-ENSAT)، (AS3232)، (ENSAT699)، (HA304) و (SDB1) در هر دو شرایط مطلوب ارزیابی شدند.

جدول ٦- اجزای چهار عامل با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر اصلی ژنوتیپ در آفتابگردان روغنی تحت تنش خشکی

Table 6. Components of four factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype main effect in oilseed sunflower under drought stress

Traits	Factor	Total average	Average of selected genotypes	Differential selection	Selection differential percentage
Leaf length (cm)	1	13.9	16.2	2.30	16.5
Leaf width (cm)	1	11.5	13.5	2.02	17.6
Petiole length (cm)	1	6.64	7.85	1.21	18.2
Stem diameter (cm)	1	4.13	4.64	0.512	12.4
Head diameter (cm)	1	10.5	11.3	0.779	7.40
Seed yield (gr-plant)	1	21.6	24.1	2.48	11.5
Day to flowering (day)	2	69.7	71.6	1.94	2.78
Day to maturity (day)	2	103	105	2.41	2.35
RWC (%)	2	62.3	61.4	-0.910	-1.46
Plant height (cm)	3	99.7	115	15.4	15.4
Number of leaf (Number)	3	16	19.1	3.06	19.1
Oil content (%)	3	45.7	45.9	0.184	0.402
Greenness index (SPAD)	4	40.3	41.4	1.11	2.76



شکل ۱- رتبه‌بندی ژنوتیپ‌های آفتابگردان روغنی با استفاده از شاخص انتخاب چند متغیره MGIDI در شرایط نرمال (سمت بالا) و تنش خشکی (سمت پایین)

Figure 1. Ranking of oilseed sunflower genotypes using MGIDI multivariate selection index under normal (top side) and drought stress (down side) conditions

تحلیل عاملی برهم‌کنش ژنوتیپ در سال

بر اساس نتایج تحلیل عاملی برهم‌کنش ژنوتیپ × سال، از ۱۳ عامل، تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی به ترتیب سه و چهار عامل مقدار ویژه بیش از یک داشتند. این عوامل به ترتیب تحت شرایط بدون تنش و تنش خشکی ۶۲/۳ درصد و ۷۱/۴ درصد از تنوع کل صفات را توجیه نمودند (جدول ۷). تحت شرایط بدون تنش در عامل اول با مقدار ویژه ۵/۱۲ که ۳۹/۴ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌نمود، صفات ارتفاع بوته، تعداد برگ، طول برگ، عرض برگ، طول دمبرگ، قطر ساقه و قطر طبق بیشترین سهم را به خود اختصاص دادند. در عامل دوم با مقادیر ویژه ۱/۶۹ و توجیه تغییرات حدود ۱۳ درصد، صفات محتوای نسبی آب، محتوای روغن و عملکرد دانه بیشترین سهم را در بین صفات دارا بودند. در عامل سوم با مقادیر ویژه ۱/۲۹ و توجیه تغییرات حدود ۹/۹۲ درصد، صفات شاخص سبزینگی، روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی بیشترین سهم را داشتند. تحت شرایط تنش خشکی در عامل اول با مقدار ویژه ۵/۱۱ و توجیه تغییرات حدود ۳۹/۳ درصد صفات ارتفاع بوته، طول برگ، عرض برگ، طول دمبرگ، قطر ساقه، قطر طبق و عملکرد دانه بیشترین تأثیر را داشتند. در عامل دوم با مقادیر ویژه ۱/۹۳ و توجیه تغییرات حدود ۱۴/۸ درصد، صفات تعداد برگ، محتوای نسبی آب و محتوای روغن بیشترین تأثیر را داشتند. عامل سوم با مقادیر ویژه ۱/۲۳ و عامل چهارم با مقادیر ویژه ۱/۰۱ به ترتیب ۹/۴۷ درصد و ۷/۷۹ درصد از تغییرات کل را توجیه می‌نمودند (جدول ۷). در عامل سوم دو صفت روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی و در عامل چهارم صفت شاخص سبزینگی بیشترین سهم را داشتند. میانگین کل ژنوتیپ‌ها برای اجزا تشکیل‌دهندهٔ هر عامل در مقایسه با ژنوتیپ‌های انتخابی در هر یک از شرایط بدون تنش و تنش خشکی (محدودیت آبیاری) در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است. تحت شرایط آبیاری بدون تنش دیفرانسیل گزینش برای همهٔ صفات به‌جز محتوای نسبی آب مثبت و بیشترین و کمترین مقادیر به ترتیب در عملکرد دانه (۲۶/۲ درصد) و محتوای نسبی آب برگ (۱/۰۹- درصد) مشاهده شد. تحت شرایط تنش خشکی دیفرانسیل گزینش برای همه صفات مثبت بود. بیشترین و کمترین میزان نیز به ترتیب در صفات عملکرد (۲۴/۵ درصد) و محتوای نسبی آب برگ (۰/۶۱۶ درصد) مشاهده شد. در رابطه با دیفرانسیل انتخاب برای صفت محتوای نسبی آب برگ با توجه به معنی‌دار بودن برهم‌کنش نتیجه‌گیری می‌شود دیفرانسیل بسته به شرایط متفاوت است. بررسی دیفرانسیل در هر یک از شرایط نشان می‌دهد تحت تنش خشکی که محدودیت آب هست عدد محتوای نسبی آب برگ مثبت است که تفاوت‌های ژنوتیپی و امکان انتخاب را نشان می‌دهد. در شرایط بدون تنش که محدودیت آب نیست و گیاه از نبود آب رنج نمی‌برد دیفرانسیل صفت به اندازهٔ شرایط تنش خشکی مهم نیست.

جدول ۷- ضرایب صفات در عامل‌های با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر برهم‌کنش ژنوتیپ × سال در آفتابگردان روغنی تحت شرایط نرمال و تنش خشکی

Table 7. Coefficient of traits in the factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype × year interaction effect in oilseed sunflower under normal and drought stress conditions

Traits	Normal					Drought stress					
	Variance	Communality	Loading factor			Variance	Communality	Loading factor			
			1	2	3			1	2	3	4
Leaf length (cm)	0.16	0.84	-0.9	-0.04	-0.17	0.12	0.88	-0.92	-0.16	-0.1	0.07
Leaf width (cm)	0.16	0.84	-0.91	0.01	-0.1	0.14	0.86	-0.92	-0.05	-0.04	0.04
Petiole length (cm)	0.29	0.71	-0.79	0.19	-0.22	0.59	0.41	-0.62	0.03	-0.14	0.01
Number of leaf	0.55	0.45	-0.49	0.44	-0.11	0.34	0.66	-0.48	-0.62	-0.11	0.18
Stem diameter (cm)	0.22	0.78	-0.86	0.12	-0.13	0.2	0.8	-0.87	-0.23	-0.06	0
Head diameter (cm)	0.48	0.52	-0.62	-0.29	-0.22	0.24	0.76	-0.86	0.06	0.02	-0.16
Plant height (cm)	0.47	0.53	-0.7	0.03	-0.19	0.32	0.68	-0.72	-0.38	-0.11	-0.04
Greenness index (SPAD)	0.65	0.35	-0.12	0.15	-0.55	0.22	0.78	-0.03	0.01	-0.15	-0.87
Day to flowering (day)	0.15	0.85	-0.31	0.15	-0.86	0.15	0.85	-0.27	-0.38	-0.79	-0.08
Day to maturity (day)	0.23	0.77	-0.1	-0.15	-0.86	0.13	0.87	0	0.03	-0.93	-0.08
RWC (%)	0.52	0.48	0.29	-0.5	0.38	0.62	0.38	-0.02	0.57	0.22	-0.05
Oil content (%)	0.74	0.26	0.07	-0.5	-0.01	0.39	0.61	0.06	0.63	-0.21	0.4
Seed yield (gr-plant)	0.28	0.72	-0.32	-0.79	0.05	0.25	0.75	-0.67	0.46	0.16	-0.25
Eigenvalues			5.12	1.69	1.29			5.11	1.93	1.23	1.01
Percentage of explained variance			39.4	13	9.92			39.3	14.8	9.47	7.79
Percentage of cumulative explained variance			39.4	52.4	62.3			39.3	54.1	63.6	71.4

جدول ۸- اجزای سه عامل با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر برهم‌کنش ژنوتیپ × سال در آفتابگردان روغنی در شرایط عادی

Table 8. Components of three factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype × year interaction effect in oilseed sunflower under normal conditions

Traits	Factor	Total average	Average of selected genotypes	Differential selection	Selection differential percentage
Plant height	1	109	115	6.25	5.76
Number of leaf	1	17	17.1	0.06	0.320
Leaf length	1	16.6	17.9	1.30	7.86
Leaf width	1	14.3	15.5	1.23	8.59
Petiole length	1	9.29	9.95	0.66	7.07
Stem diameter	1	4.78	5.11	0.34	7
Head diameter	1	13.3	15.1	1.76	13.2
RWC	2	71.3	70.5	-0.78	-1.09
Oil content	2	47.3	48.4	1.07	2.25
Seed yield	2	41.8	52.7	10.9	26.2
Greenness index	3	38.6	39.6	1.01	2.62
Day to flowering	3	74.5	76.5	2	2.68
Day to maturity	3	107	109	2.15	2

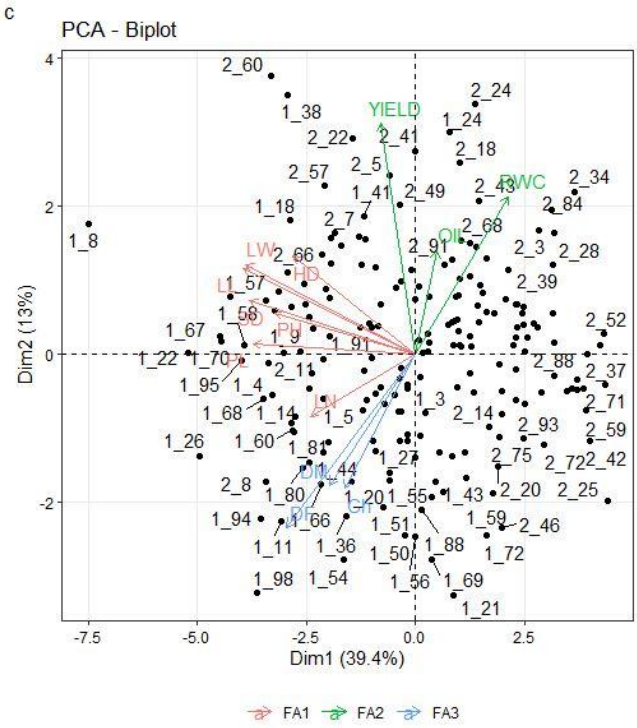
جدول ۹- اجزای چهار عامل با مقادیر ویژه بزرگتر از یک در تجزیه به عامل‌ها برای اثر برهم‌کنش ژنوتیپ × سال در شرایط تنش خشکی

Table 9. Components of four factors with eigenvalues greater than one in factor analysis for genotype × year interaction effect under drought stress conditions

Traits	Factor	Total average	Average of selected genotypes	Differential selection	Selection differential percentage
Plant height	1	99.7	106	6.31	6.33
Leaf length	1	13.9	15	1.13	8.18
Leaf width	1	11.5	12.6	1.11	9.67
Petiole length	1	6.64	7.04	0.403	6.07
Stem diameter	1	4.13	4.43	0.303	7.34
Head diameter	1	10.5	11.7	1.20	11.4
Seed yield	1	21.6	26.9	5.29	24.5
Number of leaf	2	16	16.1	0.109	0.677
RWC	2	62.3	62.7	0.384	0.616
Oil content	2	45.7	46.6	0.828	1.81
Day to flowering	3	69.7	71.6	1.94	2.78
Day to maturity	3	103	105	1.84	1.79
Greenness index	4	40.3	41.2	0.910	2.26

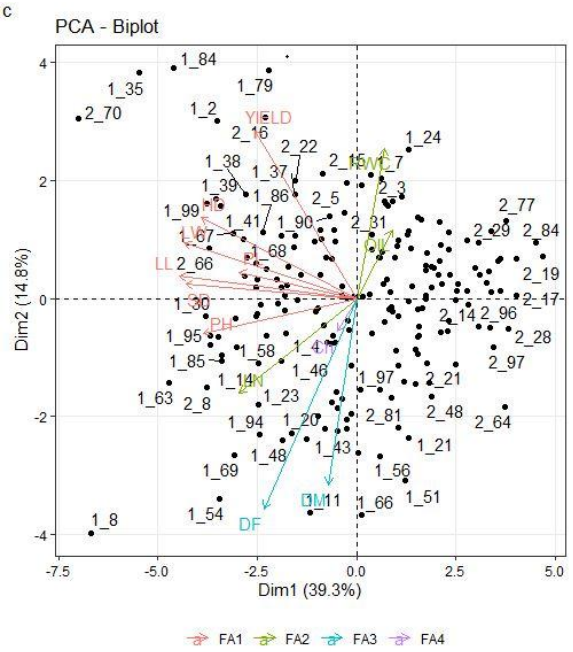
بر اساس نتایج نمودار برهم‌کنش، (شکل ۲ و ۳) تحت شرایط بدون تنش ۵۲ ژنوتیپ در سال اول و ۴۸ ژنوتیپ در سال دوم مطلوب ارزیابی شدند. در این شرایط (بدون تنش) در سال اول ژنوتیپ‌های (SDR19)، (NS-R5)، (HA337B)، (AS5304)، (SF076)، (H157/LC1064)، (AS3232)، (SDB1)، (A-CONTROLPLASTIPIC)، (AS5306)، (DM-2)، (OES)، (H049+FSB)، (RHA858)، (CAY) و (B454/03) و در سال دوم ژنوتیپ‌های (LC1064C)، (As3211)، (270-ENSAT) بیشترین سهم در تغییرات عامل اول را داشتند؛ به عبارتی این ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مربوطه بیشترین مقادیر را در صفات ارتفاع بوته، تعداد برگ، طول برگ، عرض برگ، طول دمبرگ، قطر ساقه و قطر طبق دارا بودند. این ژنوتیپ‌ها از نظر صفات فوق وضعیت مشابهی داشتند یعنی بیشترین مقادیر را در صفات فوق نسبت به ژنوتیپ‌های دیگر دارا بودند. در این شرایط (بدون تنش) در سال اول ژنوتیپ‌های (8ASB2)، (F1250/03) و (NSF1-A4R5) و در سال دوم ژنوتیپ‌های (ایرانی ۲۸)، (5AS-F1/A2*R5AS-F1/A2*R2)، (H205A/H543R)، (ایرانی ۳۶)، (ایرانی ۱۱۰)، (DM-2)، (LP-SCYB)، (SF076)، (H100A)، (H157/LC1064)، (8ASB2)، (F1250/03)، (RHA858)، (AS3232)، (SDR19)، (B454/03)، (As3211) و (RHA858) بیشترین سهم را در تغییرات عامل دوم داشتند. به عبارتی ژنوتیپ‌های این گروه از نظر محتوای نسبی آب برگ، عملکرد دانه و محتوای روغن بیشترین مقادیر را دارا بودند. ژنوتیپ‌های (RHA858)، (CAY)، (D34)، (SF092)، (270-ENSAT)، (SF109)، (LC1064C)، (803-1)، (SSD-580)، (15038)، (ایرانی ۴)، (RT948)، (283-ENSAT)، (H250A/83HR4)، (QHP-1) و (15031) در سال اول و ژنوتیپ (254-ENSAT) در سال دوم بیشترین سهم را در تغییرات عامل سوم داشتند. این ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مربوطه بیشترین مقادیر را در صفات شاخص سبزینگی، روز رسیدگی و روز تا گلدهی دارا بودند. در شرایط تنش خشکی (محدودیت آبیاری) ۵۶ ژنوتیپ در سال اول و ۴۶ ژنوتیپ در سال دوم مطلوب ارزیابی شده‌اند. در سال اول ژنوتیپ‌های (H603R)، (ایرانی ۳۶)، (B-FIPOPB)، (H209A/LC1064)، (NSF1-A4R5)، (ایرانی ۲۸)، (SF105)، (NS-R5)

(F1250/03)، (703-CHLORINA)، (SDB2)، (H543R)، (DM-2)، (ENSAT699)، (A-CONTROLPLASTIPIC)، (ایرانی ۳۸)، (HA337B) و (HA335B) و در سال دوم ژنوتیپ‌های (SDB1)، (RHA266)، (AS3232)، (LC1064C)، (RHA858) و (H100A/LC1064) بیشترین سهم را در تغییرات عامل اول داشتند و به عبارتی این ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مربوطه بیشترین مقادیر را در صفات ارتفاع بوته، طول برگ، عرض برگ، طول دمبرگ، قطر ساقه، قطر طبق و عملکرد دانه دارا بودند. در رابطه با عامل دوم در سال اول ژنوتیپ‌های (ASB28)، (As3211)، (AS5306)، (HA337B)، (OES)، (12AASB3)، (CSWW2S)، (SF092) و در سال دوم ژنوتیپ‌های (H100A/LC1064)، (H205A/H543R)، (SSD-581)، (254-ENSAT) و (RHA858) بیشترین سهم را در تغییرات عامل داشتند. به عبارتی این ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مربوطه بیشترین مقادیر را در صفات تعداد برگ، محتوای نسبی آب برگ و محتوای روغن دارا بودند. در رابطه با عامل سوم در سال اول ژنوتیپ‌های (AS5306)، (CSWW2S)، (12AASB3)، (15038)، (H158A/H543R)، (SF092)، (H156A/RHA274)، (RT948)، (LP-SCYB)، (270-ENSAT)، (H100A-90RL8)، (QHP-1) و (LC1064C) و در سال دوم ژنوتیپ (CAY) بیشترین سهم را در تغییرات عامل سوم و به عبارتی تغییرات صفات روز تا گلدهی و روز تا رسیدگی داشتند. در رابطه با عامل چهارم در سال اول ژنوتیپ ۴ بیشترین سهم را در تغییرات عامل چهارم و به عبارتی صفت شاخص سبزینگی داشت.



شکل ۲- نمودار بر اساس اثرات برهم‌کنش در شرایط نرمال با روش MGIDI، گره‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس بای‌پلات اثر برهم‌کنش محیط × صفات (فاکتورها)

Figure 2. Diagram based on mutual effects under normal conditions by MGIDI method, knotting of genotypes based on biplot of effects interaction of environment × traits (factors)



شکل ۳- نمودار گرافیکی بر اساس اثرات برهم‌کنش در شرایط تنش خشکی (محدودیت آبیاری) با روش MGIDI، گره‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس بای‌پلات اثرات برهم‌کنش محیط × صفات (فاکتورها)

Figure 3. Graphical diagram based on mutual effects under drought stress (irrigation restriction) conditions by MGIDI method, knotting of genotypes based on biplot mutual effects of environment × traits (factors)

نتیجه‌گیری

نمودار بای‌پلات برهم‌کنش امکان تفسیر راحت و قابل فهم برهم‌کنش را فراهم می‌نماید. با مشخص شدن نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌ها، کارآمدی هر ژنوتیپ جهت استفاده در برنامه‌های به‌نژادی مشخص می‌گردد. بر اساس تحلیل عاملی اثرات اصلی با توجه به مجموع نتایج ژنوتیپ (254-ENSAT) تحت هر دو شرایط بدون تنش و تنش خشکی رتبه اول را به خود اختصاص داد. در تحلیل عاملی برهم‌کنش تحت شرایط بدون تنش در سال اول و دوم بیشترین بخش تغییرات به ترتیب با دو عامل اول (صفات ارتفاع بوته، تعداد برگ، طول برگ، عرض برگ، طول دمبرگ، قطر ساقه و قطر طبق) و سوم (شاخص سبزینگی، روز رسیدگی و روز تا گلدهی) که شامل صفات عملکرد و مرتبط با عملکرد هستند و تحت شرایط تنش خشکی در سال دوم با عامل دوم (تعداد برگ، محتوای نسبی آب برگ و محتوای روغن) توجیه می‌شود. با توجه به گروه‌بندی‌های انجام‌شده و ارتباطات بین صفات تحت شرایط بدون تنش دو عامل اول و سوم و تحت شرایط تنش عامل دوم نقش مهم در رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها دارند.

سپاس گزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه به خاطر تأمین هزینه‌های مالی تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

Anjum, S.H., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026-2032. https://doi.org/ 10.5897/AJAR10.027

Askari Kalestani,A.R., Ghaffary, S.M.T., Zali, H., & Moghadam., M.E. (2025). Identification of superior bread wheat genotypes using composite indices for cultivation in warm regions. *Plant Productions*, 47(4), 491-510. https://doi.org/10.22055/ppd.2024.46831.2163 [In Persian].

Baraki, F., Gebregergis, Z., Belay, Y., Teame, G., Gebremedhin, Z., Muez Berhe, M., Dawit Fisseha, D., Goitom Araya, G., & Gebregergs, G. (2024). Identification of adaptable sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes using yield performance and multiple-traits index. *Heliyon*, 10(9), e29405. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29405

Benakanahalli, N.K., Sridhara, S., Ramesh, N., Olivoto, T., Sreekantappa, G., Tamam, N., Abdelbacki, A.M.M., Elansary, H.O., & Abdelmohsen, S.A.M. (2021). A framework for identification of stable genotypes based on MTSI and MGDII indexes: An example in Guar (*Cymopsis tetragonoloba* L.). *Agronomy*, 11(6), 1221-1241. https://doi.org/10.3390/agronomy11061221

Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., am Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., & Nawaz, A. (2018). Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 201(C), 152-166. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.028

Enyew, M., Feyissa, T., Geleta M., Tesfaye, K., Hammenhag, C., & Carlsson, A.S. (2021). Genotype by environment interaction, correlation, AMMI, GGE biplot and cluster analysis for grain yield and other agronomic traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *PLoS ONE*, 16(10), e0258211. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258211

Farahani, E., & Arzani, A. (2009). Evaluation of genetic variation of durum wheat genotypes using multivariate analyses. *Journal Crop production*, 1(4), 51-64. [In Persian].

Kaiser, H.F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. Psy507 chometrika . *Psychometmka*, 23(3), 187–200. https://doi.org/10.1007/BF02289233

Olivoto, T., Lúcio, AD., da Silva, J.A, Marchioro, V.S., de Souza, V.Q., & Jost, E. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy Journal*, 111(6), 2949-2960. https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220

Olivoto, T., & Nardino, M. (2020). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *BioRxiv*, 37(10), 1383-1389.

Olivoto, T., Diel, M.I, Schmidt, D., & Lúcio, A.D. (2022). MGIDI: A powerful tool to analyze plant multivariate data. *Plant Methods*, 18(1), 121. https://doi.org/10.1186/s13007-022-00952-5

Omidinasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2024). The effect of deficit irrigation on grain yield and some physiological indicators of sunflower (*Helianthus annus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 22(1), 71-88. https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.83198.1258 [In Persian].

Omidinasab, D., Meskarbashee, M., & Rahnama Ghahfarokhi, A. (2023). Effect of deficit irrigation on grain yield and quality characteristics of oil content of sunflower (*Helianthus annus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 97-108. http//doi.org/10.22059/ijfcs.2023.353827.654972 [In Persian].

Pallavi, M., Prasad, B.M., Shanthi, P., Reddy, V.L.N., & Kumar, A.N. (2024). Multi trait genotype-ideotype distance index (MGIDI) for early seedling vigour and yield related traits to identify elite lines in rice (Oryza sativa L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 15(1), 120 - 131. https://doi.org/10.37992/2024.1501.020

Pour-Aboughadareh, A., & Peter Poczai, P. (2021). A dataset on multi-trait selection approaches for screening desirable wild relatives of wheat. *Data in Brief*, 39, 107541. https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107541

Shen, J., Wang, X., Song, H., Wang, M., Niu, T., Lei, H., Qin, C., & Liu, A. (2023). Physiology and transcriptomics highlight the underlying mechanism of sunflower responses to drought stress and rehydration. *Iscience*, 26(11), 108112. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108112

Shi, H., Wu, Y., Yi, L., Hu, H., Su, F., Wang, Y., Li, D., & Hou, J. (2023). Analysis of QTL mapping for germination and seedling response to drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *PeerJ*, 11, e15275. https://doi.org/10.7717/peerj.15275

Shirzad, A., Asghari, A., Zali, H., Sofalian, O., & Mohammaddoust Chamanabad, H. (2023). Application of the multi-trait genotype-ideotype distance index in the selection of top barley genotypes in the warm and dry region of Darab. *Journal of Crop* Breeding, 14(44), 65-76. https://doi.org/10.52547/jcb.14.44.65 [In Persian].

Sholehah, M., Suwarno, W.B., Hapsari, V.P., Sulistyo, N.N., Marwiyah, S., & Aswidinnoor, H. (2024). Rice breeding for multi-canopy system: estimations of genetic parameters and response to selection. *Agronomy Journal*, 116(5), 2129-2140. https://doi.org/10.1002/agj2.21629

Singamsetti, A., Zaidi, P.H., Seetharam, K., Vinayan, M.T., Olivoto, T., Mahato, A., Madankar, K., Kumar, M., & Shikha, K. (2023). Genetic gains in tropical maize hybrids across moisture regimes with multi-trait-based index selection. *Frontiers in Plant Science*. 14, 1147424. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147424