Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Crop Breeding Vol. 18, Issue 2, 2026 p: 49-59

OPEN ACCESS

Research Paper

Analysis of Genetic Variance Components and Combining Ability in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Lines and Testers for Oil Content and Seed Yield Improvement

Elnaz Hajiebrahimi[1], Arash Fazeli[2] and Mehdi Ghaffari[3]

1- Ph.D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran
2- Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran, (Corresponding author: a.fazeli@ilam.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Oil Crops Research, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 10 September, 2025 Revised: 15 December, 2025 Accepted: 17 January, 2026

Extended Abstract

Background: Sunflower (*Helianthus annuus* L.), as one of the most important oilseed crops worldwide, is considered an ideal candidate for cultivation in arid and semi-arid regions of Iran due to its unique characteristics, including drought tolerance, adaptability to low-fertility soils, and relatively low water requirements. Given ongoing climate change and diminishing water resources, the development of high-yielding varieties with enhanced environmental stress tolerance has become a top research priority in plant breeding programs. The evaluation of combining ability in sunflower lines and testers plays a pivotal role in identifying superior genotypes. This study was conducted to comprehensively assess both general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) of sunflower lines and testers for key agronomic traits such as seed yield, oil content, and other yield-related characteristics using the line × tester analysis method. This investigation evaluated 18 different line × tester combinations, with data collected through a randomized complete block design. Our results demonstrate that certain hybrid combinations exhibit superior combining ability for both seed production and oil quality, suggesting their potential for improved performance across diverse environmental conditions. These findings provide a solid scientific foundation for future breeding initiatives aimed at developing high-yielding, stable hybrid varieties suitable for various growing conditions. Moreover, this research offers practical guidance to farmers for selecting optimal cultivars for cultivation in areas with water and soil constraints, thereby contributing to enhanced oilseed production at the national level.

Methods: This research was conducted at the research farm of the Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, Iran (35.84 °N latitude, 50.93 °E longitude, 1321 m altitude) during two crop years (2022-2023 and 2023-2024). The study utilized nine fertility restorer lines and two cytoplasmic male sterile (CMS) lines as testers. In the second year, 18 hybrids and 11 parental lines were cultivated in a randomized complete block design with three replications, using 65 cm row spacing and 25 cm plant spacing. Measured traits included days to flowering (DTF), flowering duration (FD), days to maturity (DTM), seed filling period (SFP), plant height (PH), head diameter (HD), thousand seed weight (TSW), seeds per head (SPH), oil content (OC), seed yield (SYH), and oil yield (OY). Soil samples were collected from 0-30 cm depth before planting. Data were analyzed using the line × tester method to estimate genetic parameters, including GCA, SCA, additive variance (σ^2A), and dominance variance (σ^2D). All statistical analyses were conducted using the agricolae package in the R software environment.

Results: The analysis of variance results showed that the effects of lines, testers, and the line × tester interaction were significant for most traits. The line effect was significant for DTM, SFP, and TSW, while the tester effect was significant for PH and SYH. The SCA was highly significant for key traits, including DTF, SYH, and OC. Specific combinations, such as Line 6 × Tester 1, had the most positive effects on SYH and SPH. The GCA for lines and testers revealed that Line 2 and Line 8 had the most positive effects on DTF and SFP, respectively. Additive and dominance variances also showed that key traits, such as SYH and OC, were more strongly influenced by dominance effects. The SCA analysis indicated that certain specific line × tester combinations had stronger interactive effects on the traits. For example, the Line 6 × Tester 1 combination showed the most positive effect on SYH (726.2) and SPH (156.6), while the Line 1

Copyright ©2026. Hajiebrahimi et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

× Tester 2 combination showed the most negative effects on these traits. These results emphasize that selecting appropriate line × tester combinations can significantly impact the improvement of crop yield and quality.
Conclusion: This study demonstrates that strategic selection of line × tester combinations plays a pivotal role in enhancing sunflower yield and quality. Line 2 (for extended growth duration) and Line 8 (for improved grain filling period) emerged as promising candidates, along with the superior-performing Line 6 × Tester 1 hybrid, for breeding programs. Conversely, the poor performance of the Line 1 × Tester 2 combination underscored the critical importance of thorough genetic compatibility assessments. Findings confirm that SCA exerts a decisive influence on key traits, such as grain yield and oil content. These results not only provide valuable guidance for parental selection and superior hybrid development but also highlight the necessity for complementary molecular studies and multi-environment trials to cultivate well-adapted, high-yielding cultivars.

Keywords: Additive Genetic Variance, Genetic Variance of Dominance, Plant breeding, Heterosis (Hybrid Vigor), Quantitative traits

How to Cite This Article: Hajiebrahimi., E, Fazeli, A., & Ghaffari, M. (2026). Analysis of Genetic Variance Components and Combining Ability in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Lines and Testers for Oil Content and Seed Yield Improvement. *J Crop Breed,* 18(2), 49-59. DOI: 10.61882/jcb.2026.1618

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

بررسی اجزای واریانس ژنتیکی و قابلیت ترکیب‌پذیری لاین‌ها و تسترهای آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) برای بهبود درصد روغن، اجزای عملکرد و عملکرد دانه

الناز حاجی ابراهیمی[۱]، آرش فاضلی[۲] و مهدی غفاری[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
۲- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران، (نویسنده مسوول: a.fazeli@ilam.ac.ir)
۳- دانشیار، بخش تحقیقات دانه‌های روغنی، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷
صفحه: ۴۹ تا ۵۹

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) به‌عنوان یکی از مهمترین گیاهان روغنی جهان، به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند مقاومت به خشکی، سازگاری با خاک‌های کم‌حاصلخیز و نیاز آبی نسبتاً کم، گزینه‌ای ایده‌آل برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود. با توجه به تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آبی، توسعه ارقام پربازده و متحمل به تنش‌های محیطی از اولویت‌های تحقیقاتی در زمینه اصلاح نباتات است. در این راستا، ارزیابی توان ترکیبی لاین‌ها و تسترهای آفتابگردان می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در شناسایی ژنوتیپ‌های برتر داشته باشد. این مطالعه با هدف بررسی جامع توان ترکیبی عمومی (GCA) و خصوصی (SCA) لاین‌ها و تسترهای آفتابگردان برای صفات مهم زراعی از جمله عملکرد دانه، درصد روغن و سایر صفات مرتبط با عملکرد با استفاده از روش تحلیل لاین × تستر انجام شد. در این تحقیق، ۱۸ ترکیب مختلف از لاین‌ها و تسترها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهند که برخی از ترکیب‌ها دارای توان ترکیبی بالایی در تولید دانه و کیفیت روغن هستند که می‌تواند به بهبود عملکرد در شرایط محیطی مختلف کمک کند.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه اصلاح نهال و بذر کرج (عرض جغرافیایی ۳۵/۸۴ شمالی، طول ۵۰/۹۳ شرقی، ارتفاع ۱۳۲۱ متر) طی ۲ سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد. از نه ژنوتیپ بازگرداننده باروری به‌عنوان لاین و دو ژنوتیپ نر عقیم سیتوپلاسمی (CMS) به‌عنوان تستر استفاده شد. در سال دوم، ۱۸ هیبرید و ۱۱ والد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار کشت شدند. فاصله ردیف‌ها ۶۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. صفات مورد اندازه‌گیری شامل روز تا گلدهی(DTF)، مدت گلدهی (FD)، روز تا رسیدگی(DTM)، دوره پر شدن دانه (SFP)، ارتفاع بوته (PH)، قطر طبق (HD)، وزن هزار دانه (TSW)، تعداد دانه در طبق (SPH)، درصد روغن (OC)، عملکرد دانه (SYH) و عملکرد روغن (OY) بودند. تجزیه داده‌ها با روش لاین × تستر انجام و پارامترهای ژنتیکی شامل توان ترکیب‌پذیری عمومی(GCA)، توان ترکیب‌پذیری خصوصی(SCA)، واریانس افزایشی (σ^2A) و واریانس غالبیت (σ^2D) برآورد شدند. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از بسته نرم‌افزاری agricolae در محیط R انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج تحلیل واریانس نشان دادند که اثرات لاین‌ها، تسترها و اثر متقابل لاین × تستر برای اکثر صفات معنادار بودند. اثر لاین‌ها برای صفات روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه و وزن هزاردانه معنادار بود، در حالی‌که اثر تسترها برای صفات ارتفاع بوته و عملکرد دانه در هکتار معنادار شد. توان ترکیب‌پذیری خصوصی برای صفات کلیدی مانند تعداد روز تا گلدهی، عملکرد دانه و درصد روغن بسیار معنادار بود. ترکیب‌های خاصی مانند لاین ۶ و تستر ۱ بیشترین اثر مثبت را بر عملکرد دانه در هکتار و تعداد دانه در طبق داشتند. توان ترکیب‌پذیری عمومی برای لاین‌ها و تسترها نشان داد که لاین ۲ و لاین ۸ به‌ترتیب بیشترین اثرات مثبت را بر تعداد روز تا گلدهی و دوره پرشدن دانه داشتند. واریانس‌های افزایشی و غالبیت نشان دادند که صفات کلیدی مانند عملکرد دانه و درصد روغن تحت تأثیر اثرات غالبیت قوی‌تری قرار داشتند. توان ترکیبی خصوصی نشان داد که برخی ترکیب‌های خاص لاین‌ها و تسترها اثرات متقابل قوی‌تری بر صفات داشتند. برای مثال، ترکیب لاین ۶ و تستر ۱ بیشترین اثر مثبت را بر عملکرد دانه در هکتار (۷۲۶/۲) و تعداد دانه در طبق (۱۵۶/۶) داشت، در حالی‌که ترکیب لاین ۱ و تستر ۲ بیشترین اثر منفی را بر این صفات نشان داد. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب ترکیب‌های مناسب لاین و تستر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی داشته باشد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب هوشمندانه ترکیب لاین‌ها و تسترها نقش کلیدی در بهبود عملکرد و کیفیت آفتابگردان دارد. لاین‌های ۲ و ۸ به‌ترتیب برای طول دوره رشد و افزایش مدت پر شدن دانه، و ترکیب برتر لاین ۶ × تستر ۱ با عملکرد ممتاز، گزینه‌های امیدبخشی برای برنامه‌های اصلاحی هستند. در مقابل، ترکیب نامناسب لاین ۱ × تستر ۲ نتایج ضعیفی را نشان داد که اهمیت ارزیابی دقیق روابط ژنتیکی را برجسته می‌سازد. یافته‌ها ثابت می‌کنند که توان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر صفات کلیدی مانند عملکرد دانه و درصد روغن دارد. این نتایج نه‌تنها راهنمای ارزشمندی برای انتخاب والدین و تولید هیبریدهای برتر است، بلکه لزوم انجام مطالعات تکمیلی مولکولی و ارزیابی‌های چندمحیطی را برای توسعه ارقام سازگار و پربازده تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: به‌نژادی گیاهی، واریانس ژنتیکی غالبیت، هتروزیس (برتری هیبرید)، واریانس ژنتیکی افزایشی، صفات کمی

مقدمه

اصلاح نباتات به عنوان یکی از ارکان اصلی کشاورزی مدرن، نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی، بهبود کیفیت محصولات و سازگاری با تغییرات محیطی ایفا می‌کند.

مفهوم تحلیل لاین × تستر که در زمینه اصلاح نباتات از اهمیت بنیادین برخوردار است، اولین بار توسط کمپثورن[1] در سال ۱۹۵۷ معرفی شد. این روش از آن زمان به‌عنوان یک تکنیک حیاتی برای ارزیابی توان ترکیبی لاین‌های ژنتیکی مختلف، به‌ویژه در توسعه ارقام هیبرید، مورد استفاده قرار گرفته است. رویکرد لاین × تستر به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا پتانسیل ژنتیکی لاین‌های اینبرد (خالص) را با تلاقی آن‌ها با چندین تستر ارزیابی کنند و در نتیجه، توان

[1] Kempthorne

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

ترکیبی عمومی[2] و توان ترکیب‌پذیری خصوصی (Specific Combining Ability) را تعیین نمایند (Fellahi *et al.*, 2013). آفتابگردان به‌دلیل مقاومت به خشکی و توانایی رشد در خاک‌های با حاصلخیزی متوسط، گزینه مناسبی برای کشت در مناطق مختلف ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Kazemi *et al.*, 2018). تجزیه لاین × تستر روشی است که به‌طور گسترده در اصلاح نژاد آفتابگردان استفاده شده است و برای ارزیابی توان ترکیب‌پذیری لاین‌های والدینی و هیبریدهای آنها استفاده می‌شود. این روش به شناسایی توان ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) و توان ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) کمک می‌کند که برای درک اثرات ژنتیکی افزایشی و غیر افزایشی بر صفاتی مانند عملکرد، محتوای روغن و ارتفاع گیاه بسیار مهم هستند (Andarkhor *et al.*, 2012; Tan, 2010).

استفاده از هتروزیس (برتری هیبرید) باعث شده است که آفتابگردان به یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در بسیاری از کشورهای شرق و غرب اروپا، روسیه و آمریکای جنوبی تبدیل شود. همچنین، این گیاه در کشورهایی مانند ایالات متحده آمریکا، استرالیا، آفریقای جنوبی، چین، هند و ترکیه به‌عنوان یک محصول مهم کشاورزی شناخته می‌شود. کشت آفتابگردان در ایران توسط مطالعات مختلف زراعی که بر بهبود عملکرد از طریق انتخاب هیبرید و شیوه‌های بهینه کشاورزی متمرکز است حمایت می‌شود (Ghaffari *et al.*, 2020). بنابر این، اصلاح هیبرید آفتابگردان نقش حیاتی در بهبود این گیاه ایفا کرده است. افزایش عملکرد دانه و روغن، اولویت اصلی اکثر برنامه‌های اصلاح نباتات آفتابگردان است و هدف اصلی در اصلاح هیبرید این گیاه، بهره‌برداری از مزایای هتروزیس است (Lakshman *et al.*, 2019). مطالعات نشان داده‌اند که برخی لاین‌ها و تسترهای آفتابگردان اثرات GCA قابل توجهی نشان می‌دهند که آنها را به گزینه‌های ایده‌آل برای هیبریداسیون تبدیل می‌کند (Razzaq *et al.*,2023; Saleem *et al.*, 2014).

برنامه‌های جهانی اصلاح نباتات آفتابگردان معمولاً بر توسعه لاین‌های اینبرد (خالص) متمرکز هستند که دارای ویژگی‌هایی مانند عملکرد بالای دانه، میزان روغن زیاد و مقاومت به تنش‌های زیستی و غیر زیستی باشند (Yin *et al.*, 2005). با این‌حال، بسیاری از مطالعات انجام‌شده تاکنون بر روی تعداد محدودی از لاین‌ها و تسترها متمرکز بوده‌اند و تنوع ژنتیکی کافی در این مطالعات در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این، تأثیر متقابل بین لاین‌ها و تسترها در شرایط محیطی مختلف به‌طور کامل بررسی نشده است. در این تحقیق، توان ترکیبی لاین‌ها و تسترها برای صفات مهمی مانند عملکرد دانه، درصد روغن به‌طور جامع بررسی شد است. همچنین، در این مطالعه از لاین‌های نرعقیم سیتوپلاسمی و بازگرداننده باروری استفاده شده است. نتایج این مطالعه می‌توانند به شناسایی ترکیبات هیبرید برتر با عملکرد بالا، درصد روغن مطلوب کمک کنند. همچنین، این یافته‌ها زمینه را برای بهینه‌سازی برنامه‌های اصلاح نباتات آفتابگردان از طریق انتخاب والدین مطلوب و توسعه هیبریدهای سازگار با شرایط محیطی مختلف فراهم می‌نمایند. چنین دستاوردی نه‌تنها به افزایش پایداری تولید این محصول استراتژیک می‌انجامد، بلکه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر گیاهان روغنی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج، ایران (عرض جغرافیایی ۳۵/۸۴ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۰/۹۳ درجه شرقی؛ ارتفاع ۱۳۲۱ متر از سطح دریا) طی دو فصل زراعی (۱۴۰۲ و ۱۴۰۳) انجام شد. مواد آزمایشی شامل نه لاین بازگرداننده باروری و ۲ لاین نرعقیم سیتوپلاسمی (CMS) به‌عنوان تستر در سال اول بود. در سال دوم، ۱۸ هیبرید حاصل و ۱۱ والد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در هر سال کشت شدند. هر کرت شامل دو ردیف ۵ متری بود. فاصله بین ردیف‌ها ۶۵ سانتیمتر و فاصله بین گیاهان روی ردیف ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. صفات اندازه‌گیری شده طی فصل رشد شامل روز تا گلدهی، مدت گلدهی، روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، خواب گیاه، ارتفاع بوته (سانتیمر)، ارتفاع طبق (سانتیمتر)، خمیدگی ساقه (سانتیمتر)، قطر طبق (سانتیمتر)، قطر ساقه (میلیمتر)، وزن هزار دانه (گرم)، تعداد دانه در طبق، درصد روغن، عملکرد دانه در هکتار (کیلوگرم در هکتار) و عملکرد روغن (کیلوگرم در هکتار) بودند (Miller & Fick, 1997).

برای تعیین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مرتبط با خاک محل آزمایش، قبل از اجرای طرح، یک نمونه ترکیبی خاک از ۰ تا ۳۰ سانتیمتری سطح خاک به‌طور متوسط از چهار بخش مزرعه آزمایشی با استفاده از دستگاه اوگر تهیه شد.

داده‌ها با استفاده از روش تحلیل لاین × تستر (Andarkhor *et al.*, 2012; Henderson, 1952) مورد بررسی قرار گرفتند تا توان ترکیب پذیری عمومی (GCA)، توان ترکیب پذیری خصوصی (SCA) و اجزای واریانس مربوطه برآورد شوند. برآورد اثرات توان ترکیب‌پذیری عمومی رابطه (۱) و خصوصی رابطه (۲) والدین و هیبریدها از طریق معادلات زیر انجام شد:

رابطه ۱ برآورد اثرات ترکیب پذیری عمومی (GCA):

برای لاین‌ها (والد مادری)

$$\mathrm{GCA}_i = \frac{X_{i..}}{f \cdot r} - \frac{X_{...}}{f \cdot m \cdot r}$$

برای تسترها (والد پدری)

$$\mathrm{GCA}_j = \frac{X_{.j.}}{m \cdot r} - \frac{X_{...}}{f \cdot m \cdot r}$$

رابطه ۲ برآورد اثرات ترکیب پذیری خصوصی:(SCA)

$$\mathrm{SCA}_{ij} = S_{ij} - \frac{X_{ij}}{r} - \frac{X_{i..}}{f \cdot r} - \frac{X_{.j.}}{m \cdot r} + \frac{X_{...}}{f \cdot m \cdot r}$$

تعداد لاین‌های نر عقیم سیتوپلاسمی (والد مادری): f

[2] General Combining Ability

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

تعداد تسترها (والد پدری): m
تعداد تکرارها: r
$X_{ij.}$: مجموع تمام هیبریدهای حاصل از تلاقی لاین i با تمام تسترها
$X_{.jk}$: مجموع تمام هیبریدهای حاصل از تلاقی تستر j با تمام لاین‌ها
$X_{..}$: مجموع همه هیبریدها
$Z_{ij.}$: ز مجموع هیبریدهای حاصل از تلاقی لاین i با تستر j
S_{ij}: ز اثر ترکیب‌پذیری خصوصی برای هیبرید حاصل از لاین i و تستر j

واریانس افزایشی (Additive Variance) اساساً بر این اصل استوار است که افراد به درجات مختلف، آلل‌های مشترکی را به‌دلیل قرابت ژنتیکی بین خود به اشتراک می‌گذارند. بر اساس مدل بینهایت کوچک (Infinitesimal Model)، که فرض می‌کند تعداد بسیار زیادی آلل هرکدام اثر کوچکی بر صفت دارند، شباهت فنوتیپی بین خویشاوندان را می‌توان مستقیماً با قرابت ژنتیکی آن‌ها مرتبط دانست (Labroo *et al.*, 2021). این مدل پایه‌ای را برای پیش‌بینی عملکرد هیبریدها بر اساس ترکیب ژنتیکی لاین‌های والدینی فراهم می‌کند. واریانس غالبیت تأثیر قابل توجهی بر هتروزیس (برتری هیبرید) دارد زیرا آلل‌های غالب ممکن است بدون توجه به حالت زیگوسیتی (هم‌بارز یا غالب)، اثرات فنوتیپی خود را بروز دهند. این موضوع به‌ویژه برای صفاتی که غالبیت تأثیر جهت‌داری بر سازگاری دارد، حائز اهمیت است. در مقابل، جهش‌های مغلوب تنها در حالت هموزیگوسیتی (هم‌بارز) به‌صورت فنوتیپی بروز می‌کنند، که این امر می‌تواند باعث تداوم آن‌ها در جمعیت‌ها شود، حتی اگر اثرات نامطلوبی داشته باشند (Labroo *et al.*, 2021). همچنین، برهمکنش‌های اپیستاتیک، که در آن اثر یک آلل به حضور آلل‌ها در لوکوس‌های دیگر بستگی دارد، به واریانس ژنتیکی مشاهده شده در عملکرد هیبریدها کمک می‌کنند. این برهم‌کنش‌ها پیش‌بینی توان ترکیب‌پذیری خصوصی (Specific Combining Ability) را پیچیده‌تر می‌سازند (Ahmed *et al.*, 2022).

برآورد واریانس ژنتیکی افزایشی (۳) و غالبیت (۴) والدین و هیبریدها از طریق معادلات زیر انجام شد:
رابطه ۳ برآورد واریانس ژنتیکی افزایشی: (σ^2_A)

$$\sigma_A^2 = \frac{\sigma_{GCA}^2}{1+F}$$

تعریف متغیرها:
σ_{GCA}^2: واریانس توان ترکیبی عمومی (General Combining Ability Variance)
F :ضریب همخونی ($F = 1$، برای لاین‌های اینبرد در نظر گرفته می‌شود)
(۴) برآورد واریانس ژنتیکی غالبیت: (σ^2_D)

$$\sigma_D^2 = \sigma_S^2 CA - \sigma_A^2$$

∂^2_SCA: واریانس توان ترکیب‌پذیری خصوصی (Specific Combining Ability Variance)
∂^2_A: واریانس ژنتیک افزایشی (Additive Genetic Variance)

تمام تحلیل‌های آماری شامل تجزیه واریانس (ANOVA) و برآورد توان ترکیب‌پذیری عمومی و خصوصی با استفاده از بسته agricolae (De Mendiburu & Simon, 2015) در محیط نرم‌افزار R انجام شدند.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل واریانس نشان دادند که اثرات لاین‌ها، تسترها، و اثر متقابل لاین × تستر برای اکثر صفات مورد مطالعه معنادار بودند (جدول ۱). اثر لاین‌ها برای صفات روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، قطر ساقه و وزن هزار دانه معنادار بود ($P < 0.05$)، در حالی که برای سایر صفات معناداری آماری مشاهده نشد. از سوی دیگر، اثر تسترها برای صفات ارتفاع بوته، خمیدگی ساقه، و عملکرد دانه در هکتار معنادار بود ($P < 0.05$).

نتایج این مطالعه نشان دادند که اثرات لاین‌ها، تسترها و اثر متقابل لاین × تستر برای صفات کلیدی مانند روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، ارتفاع بوته، وزن هزاردانه و عملکرد دانه در هکتار معنادار بودند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که تنوع ژنتیکی قابل‌توجهی بین والدین وجود دارد و عملکرد هر لاین به‌شدت تحت تأثیر تستر مورد استفاده قرار می‌گیرد. معناداری اثر متقابل نشان‌دهنده این است که برخی لاین‌ها در ترکیب با تسترهای خاص به عملکرد بهینه می‌رسند. بنابراین، انتخاب هوشمندانه والدین بر اساس ترکیب‌پذیری آنها می‌تواند منجر به توسعه هیبریدهای برتر با صفات مطلوب زراعی شود. این نتایج اهمیت ارزیابی سیستماتیک ترکیب‌های مختلف لاین × تستر را در برنامه‌های اصلاحی آفتابگردان برجسته می‌سازند.

یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش‌شده توسط مطالعات پیشین مطابقت دارند. برای مثال، (Attia, 2020; Rehman *et al.*, 2021) نیز نشان دادند که اثر متقابل لاین × تستر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر صفات زراعی داشته باشد. برتری تلاقی‌ها نسبت به والدین برای اکثر صفات و مشاهده اثر هتروزیس نشان می‌دهد که استفاده از هیبریداسیون می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

جدول ۱- تحلیل واریانس (ANOVA) برای صفات مورد مطالعه و بررسی اثرات لاین‌ها، تسترها، و اثر متقابل لاین × تستر.

Table 1. Analysis of Variance (ANOVA) for Studied Traits and Effects of Lines, Testers, and the Line × Tester Interaction.

OY	SYH	OC	SPH	TSW	SD	HD	SL	HH	PH	DOR	SFP	DTM	FD	DTF	Source of Variation
1970.76	9308.08	0.973	17234.34	9.079	3.626	0.770	93.991	151.444	12.908	2.793	0.414	9.759***	0.839	8.322***	Replications
839948.1***	3560172.6***	17.352***	216493.1***	230.413***	9.676***	9.610***	339.837***	315.722***	462.032***	304.914***	15.443***	16.704***	5.273***	11.107***	Treatments
40837.7***	234894.7***	22.459**	12492.6	305.214***	13.470***	21.391***	399.700***	514.892***	714.181***	746.673***	1.473	9.758***	1.758*	13.739***	Parents
19611837.9***	84687492.0***	107.821***	5043109.9***	1056.272***	37.943***	13.825**	1327.864***	958.647***	75.4	841.359***	137.497***	148.056***	119.042***	109.595***	Parents vs. Crosses
205784.2***	744023.2***	9.026	52574.7***	137.833***	5.782*	2.432*	246.504***	160.745*	336.452***	13.5	16.480***	13.064***	0.649	3.765***	Crosses
108235.9	450574.8	4.019	74907.2	190.201*	5.559	3.441	212.509	199.935	243.181	10.125	17.542	11.282	0.380	1.792	Lines
825957.1	2402024.5	44.717	1529.7	430.107*	11.016	0.595	988.542*	79.126	1274.422	37.5	37.5	44.463	1.852	0.667	Testers
225810.8***	830221.5***	9.572	36622.9**	48.930***	5.350*	1.654	187.745**	131.756	312.477**	13.875	12.792***	10.921***	0.769	6.125***	Lines × Testers
15004.4	67220.3	6.895	11814.2	12.005	2.513	1.307	51.151	75.325	89.831	9.543	1.688	0.723	0.851	0.846	Error

صفات مورد مطالعه شامل: روز تا گلدهی (DTF: Days to Flowering)، مدت گلدهی (FD: Flowering Duration)، روز تا رسیدگی (DTM: Days to Maturity)، دوره پر شدن دانه (SFP: Seed Filling Period)، دوره خواب گیاه (DOR: Do rmancy)، ارتفاع بوته(PH: Plant Height) ، ارتفاع طبق (HH: Head Height)، خمیدگی ساقه (SL: Stem Lodging)، قطر طبق (HD: Head Diameter)، قطر ساقه (SD: Stem Diameter)، وزن هزار دانه (TSW: Thousand Seed Weight) ، تعداد دانه در طبق (SPH: Seeds per Head)، درصد روغن (OC: Oil Content) ، عملکرد دانه در هکتار(SYH: Seed Yield per Hectare) و عملکرد روغن (OY: Oil Yield) بودند.

لاین - (Line) ژنوتیپ‌های خالص والد مادری، تستر - (Tester) ژنوتیپ والد پدری، هیبرید - (Hybrid) فرزندان حاصل از تلاقی، توان ترکیبی عمومی - (GCA) عملکرد ژنتیکی لاین/تستر در انتقال صفات به تمام هیبریدها، توان ترکیب‌پذیری خصوصی - (SCA) عملکرد خاص یک ترکیب لاین × تستر، هتروزیس - (Heterosis) برتری هیبرید نسبت به والدین، تکرار - (Replication) بلوک‌های آزمایشی، تیمار - (Treatment) عوامل آزمایشی، خطا - (Error) تغییرات تصادفی.

Days to Flowering (DTF), Flowering Duration (FD), Days to Maturity (DTM), Seed Filling Period (SFP), Dormancy (DOR), Plant Height (PH) (cm), Head Height (HH) (cm), Stem Lodging (SL) (cm), Head Diameter (HD) (cm), Stem Diameter (SD) (mm), Thousand Seed Weight (TSW) (g), Seeds per Head (SPH), Oil Content (OC), Seed Yield per Hectare (SYH) (kg ha^{-1}), Oil Yield (OY) (kg ha^{-1}).

سطوح معناداری آماری با نمادهای ستاره به این صورت نشان داده شده‌اند: سه ستاره (***) نشان‌دهنده معناداری در سطح ۰،۱ درصد ($P < 0.001$)، دو ستاره (**) نشان‌دهنده معناداری در سطح ۱ درصد ($P < 0.01$)، و یک ستاره (*) نشان‌دهنده معناداری در سطح ۵ درصد ($P < 0.05$)هستند.

جدول ۲- پارامترهای ژنتیکی، سهم لاین‌ها و تسترها، و نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای صفات مورد مطالعه

Table 2. Genetic parameters, contributions of lines and testers, and ANOVA results for the studied traits

OY	SYH	OC	SPH	TSW	SD	HD	SL	HH	PH	DOR	SFP	DTM	FD	DTF	پارامتر
-211.1–212.9	-489.4–390.6	-1.37–1.06	-167.6–156.1	-7.16–10.20	-1.30–0.77	-1.13–0.98	-9.51–11.63	-9.21–8.85	-9.30–8.70	-1.5–1.5	-1.83–2.50	-1.37–2.80	-0.43–0.41	-1.11–0.56	GCA-L (Range)
±123.7	±210.9	±0.91	±5.32	±2.82	±0.45	±0.11	±4.28	±1.21	±4.86	±0.83	±0.83	±0.91	±0.19	±0.11	GCA-T (Range)
±394.3	±726.2	±1.76	±156.6	±5.41	±1.28	±1.76	±7.33	±8.88	±13.09	±2.33	±2.33	±2.43	±0.82	±1.61	SCA (Range)
۰	۰	۰	1607	8.96	0.04	0.08	5.92	2.92	2.42	۰	0.37	0.22	۰	۰	σ^2A (F=0)
140537.7	508667.5	1.78	16539.1	24.62	1.89	0.23	91.06	37.62	148.43	2.89	7.4	6.8	۰	3.52	σ^2D (F=0)
24.8	28.5	21	67	64.9	45.2	66.6	40.6	58.5	34	35.3	50.1	40.6	27.5	22.4	Lines Contribution (%)
23.6	19	29.1	0.2	18.4	11.2	1.4	23.6	2.9	22.3	16.3	13.4	20	16.8	1	Testers Contribution (%)
51.6	52.5	49.9	32.8	16.7	43.5	32	35.8	38.6	43.7	48.4	36.5	39.3	55.7	76.6	L×T Contribution (%)
0.841	0.797	0.879	0.166	0.036	0.479	0.16	0.433	0.285	0.635	0.667	0.333	0.482	0.831	0.949	ANOVA-L (p-value)
0.092	0.127	0.063	0.843	0.018	0.189	0.565	0.05	0.461	0.078	0.139	0.125	0.078	0.159	0.75	ANOVA-T (p-value)
<0.001	<0.001	0.222	0.006	0.001	0.048	0.28	0.002	0.107	0.003	0.195	<0.001	<0.001	0.521	<0.001	ANOVA-L×T (p-value)

` پارامترها شامل: GCA-L (دامنه توان ترکیب‌پذیری عمومی لاین‌ها)، GCA-T (دامنه توان ترکیب‌پذیری عمومی تسترها)، SCA (دامنه توان ترکیب‌پذیری خصوصی)، σ^2A (واریانس ژنتیکی افزایشی)، σ^2D (واریانس ژنتیکی غالبیتی)، Lines Contribution (سهم لاین‌ها)، Testers Contribution (سهم تسترها)، L×T Contribution (سهم اثر متقابل لاین × تستر)، ANOVA-L (سطح معناداری اثر لاین‌ها)، ANOVA-T (سطح معناداری اثر تسترها) و ANOVA-L×T (سطح معناداری اثر متقابل لاین × تستر) بودند.

صفات مورد بررسی عبارتند از: DTF (روز تا گلدهی)، FD (مدت گلدهی)، DTM (روز تا رسیدگی)، SFP (دوره پر شدن دانه)، DOR (دوره خواب گیاه)، PH (ارتفاع بوته)، HH (ارتفاع طبق)، SL (خمیدگی ساقه)، HD (قطر طبق)، SD (قطر ساقه)، TSW (وزن هزار دانه)، SPH (تعداد دانه در طبق)، OC (درصد روغن)، SYH (عملکرد دانه در هکتار) و OY (عملکرد روغن).

Days to Flowering (DTF), Flowering Duration (FD), Days to Maturity (DTM), Seed Filling Period (SFP), Dormancy (DOR), Plant Height (PH) (cm), Head Height (HH) (cm), Stem Lodging (SL) (cm), Head Diameter (HD) (cm), Stem Diameter (SD) (mm), Thousand Seed Weight (TSW) (g), Seeds per Head (SPH), Oil Content (OC), Seed Yield per Hectare (SYH) (kg ha^{-1}), Oil Yield (OY) (kg ha^{-1}).

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

نتایج جدول ۲ اطلاعات جامعی درباره پارامترهای ژنتیکی، سهم لاین‌ها و تسترها، و نتایج تحلیل واریانس ANOVA برای صفات مختلف ارائه می‌دهند. محدوده توان ترکیبی عمومی GCA برای لاین‌ها در صفات مختلف متغیر است؛ برای تعداد روز تا گلدهی بین ۱/۱۱- تا ۰/۵۶ و برای عملکرد دانه در هکتار بین ۴۸۹/۴- تا ۳۹۰/۶ متغیر است، که اثرات مثبت و منفی لاین‌ها بر این صفات را نشان می‌دهد. محدوده GCA برای تسترها کوچک‌تر است؛ به‌عنوان نمونه، برای مدت گلدهی ۰/۱۹ ± و برای ارتفاع بوته PH ۴/۸۶±، که نشان‌دهنده تغییرات کمتر بین تسترها است. محدوده توان ترکیب‌پذیری خصوصی SCA برای صفات مختلف، از جمله تعداد روز تا گلدهی ۱/۶۱ ± و عملکرد دانه در هکتار SYH ۷۲۶/۲±، نشان‌دهنده اثرات متقابل قوی بین لاین‌ها و تسترها است. واریانس افزایشی σ^2A برای برخی صفات مانند روز تا رسیدگی ۰/۲۲ و دوره پر شدن دانه ۰/۳۷ مثبت است که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی افزایشی است؛ اما برای صفاتی مانند عملکرد دانه در هکتار ۸۶۸۳/۷ - و عملکرد روغن ۲۰۱۷/۵ - منفی است، که ممکن است نشان‌دهنده محدودیت در برآورد واریانس باشد. واریانس غالبیتی σ^2D برای اکثر صفات مثبت و قابل توجه است؛ به‌عنوان مثال، برای ارتفاع بوته ۱۴۸/۴۳ و عملکرد دانه در هکتار SYH ۵۰۸۶۶۷/۵، که نشان‌دهنده نقش غالبیت در کنترل ژنتیکی صفات است که در مطالعات دیگر هم نقش غالبیت در عملکرد دانه آفتابگردان تأیید شده است (Ghaffari *et al*., 2020; Memon *et al*., 2015). سهم لاین‌ها در کنترل صفات دوره پرشدن دانه ٪۵۰/۱، وزن هزار دانه ٪۶۴/۹، و تعداد دانه در طبق ٪۶۷ بیشترین است، در حالی‌که سهم تسترها در کنترل صفات مدت گلدهی ٪۱۶/۸، ارتفاع بوته ٪۲۲/۳، و عملکرد دانه در هکتار ٪۱۹ بیشتر است.

اثر متقابل لاین × تستر بیشترین سهم را در کنترل صفات تعداد روز تا گلدهی ٪۷۶/۶، مدت گلدهی ٪۵۵/۷، و عملکرد دانه در هکتار ٪۵۲/۵ دارد. نتایج تحلیل واریانس ANOVAنشان می‌دهند که اثر لاین‌ها برای اکثر صفات غیر معنادار است ($p > 0.05$)، به‌جز برای قطر ساقه ($p = 0.036$). اثر تسترها برای برخی صفات مانند قطر ساقه ($p =0.018$) و ارتفاع بوته ($p = 0.078$) معنادار است. اثر متقابل لاین × تستر برای اکثر صفات مانند تعداد روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی، دوره پر شدن دانه، ارتفاع بوته، و عملکرد دانه در هکتار بسیار معنادار است ($p <0.01$). برای دوره خواب گیاه، محدوده GCA برای لاین‌ها بین ۱/۵- تا ۱/۵ و برای تسترها ۰/۸۳ ± متغیر است. محدوده SCA برای این صفت ۲/۳۳ است. واریانس افزایشی σ^2A برای منفی ۰/۰۴- است، در حالی‌که واریانس غالبیتی σ^2D مثبت ۲/۸۹ است. سهم لاین‌ها در کنترل این صفت ٪۳۵/۳، سهم تسترها ٪۱۶/۳، و سهم اثر متقابل لاین × تستر ۴۸/۴ درصد است. نتایج تحلیل واریانس ANOVA نشان می‌دهند که اثر لاین‌ها ($p = 0.667$) و تسترها ($p = 0.139$) برای دوره خواب گیاه غیر معنادار است، اما اثر متقابل لاین × تستر ($p = 0.195$) نیز غیر معنادار است.

نتایج این مطالعه نشان دادند که لاین‌ها و تسترها بر صفات مختلف اثرات متفاوتی داشتند و اثر متقابل لاین × تستر برای اکثر صفات بسیار معنادار بود. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب ترکیب‌های مناسب لاین و تستر می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود صفات زراعی داشته باشد. محدوده توان ترکیبی عمومی GCA برای لاین‌ها و تسترها نشان داد که لاین‌ها تنوع ژنتیکی بیشتری نسبت به تسترها دارند. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در منابع ژنتیکی لاین‌ها و تسترها باشد. همچنین، اثر متقابل لاین × تستر برای صفات کلیدی مانند تعداد روز تا گلدهی و عملکرد دانه در هکتار بسیار معنادار بود، که نشان‌دهنده اهمیت انتخاب ترکیب‌های مناسب برای بهبود این صفات است.

یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش‌شده توسط (Arshad *et al*., 2024; Mohammadi *et al*., 2021; Shelke *et al*., 2024) مطابقت دارند، که نشان دادند اثر متقابل لاین × تستر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر صفات زراعی داشته باشد. با این‌حال، در مطالعه‌ای (Sarkar *et al*., 2019)، اثر لاین در تستر برای برخی صفات فلفل قرمز معنادار نبود، که ممکن است ناشی از عوامل ژنتیکی و نوع عمل ژن‌ها باشد. در برخی مطالعات، مشخص شده است که صفات خاصی مانند ارتفاع گیاه، عرض میوه و تعداد دانه‌ها در هر میوه تحت تأثیر عمل ژن‌های افزایشی قرار دارند. برتری ترکیب‌های خاص لاین × تستر برای صفات کلیدی مانند عملکرد دانه در هکتار و تعداد دانه در طبق نشان می‌دهد که استفاده از این ترکیب‌ها می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای برنامه‌های اصلاح نباتات در آینده مورد استفاده قرار گیرند.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

جدول ۳- توانایی ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) لاین‌ها و تسترها برای صفات مورد مطالعه
Table 3. General Combining Ability (GCA) of Lines and Testers for the Studied Traits.

Line/Tester	DTF	FD	DTM	SFP	DOR	PH	HH	SL	HD	SD	TSW	SPH	OC	SYH	OY
Line 1	0.056	0.074	-1.37	-1.5	-1.5	-9.302	-4.32	-1.248	-0.741	-1.303	-3.63	-167.57	1.063	-489.426	-211.109
Line 2	0.389	0.407	-1.037	-1.833	-1.5	3.975	0.791	1.595	0.981	1.265	-0.13	100.009	0.536	390.574	212.928
Line 3	0.389	-0.093	-1.204	-1.5	0	8.698	0.902	4.884	0.926	0.468	2.304	-7.168	0.759	106.241	68.541
Line 4	0.056	0.074	-0.537	-0.667	1.5	1.753	5.396	-5.247	0.426	0.974	-7.163	138.017	0.114	66.074	36.461
Line 5	0.556	0.074	-0.537	-1.167	0	-10.414	-6.709	-0.409	-0.074	-1.189	10.204	-98.119	-1.366	43.907	-23.551
Line 6	-0.111	-0.259	0.13	0.5	1.5	-1.914	8.846	-9.506	-0.602	0.164	-7.163	156.147	0.059	132.907	64.148
Line 7	-0.611	-0.426	0.296	1.333	0	5.253	-9.209	11.629	-0.324	0.767	2.67	4.087	0.439	141.741	72.062
Line 8	0.389	-0.093	2.796	2.5	-1.5	1.864	2.235	-0.278	0.537	-0.212	4.37	-42.627	-0.779	-0.426	-24.788
Line 9	-1.111	0.241	1.463	2.333	1.5	0.086	2.069	-1.42	-1.13	-0.935	-1.463	-82.776	-0.827	-391.593	-194.692
Tester 1	0.111	-0.185	-0.907	-0.833	-0.833	-4.858	1.21	-4.279	0.105	-0.452	-2.822	-5.322	-0.91	-210.907	-123.675
Tester 2	-0.111	0.185	0.907	0.833	0.833	4.858	-1.21	4.279	-0.105	0.452	2.822	5.322	0.91	210.907	123.675

صفات مورد بررسی عبارتند از: DTF (روز تا گلدهی)، FD (مدت گلدهی)، DTM (روز تا رسیدگی)، SFP (دوره پر شدن دانه)، DOR (دوره خواب گیاه)، PH (ارتفاع بوته)، HH (ارتفاع طبق)، SL (خمیدگی ساقه)، HD (قطر طبق)، SD (قطر ساقه)، TSW (وزن هزار دانه)، SPH (تعداد دانه در طبق)، OC (درصد روغن)، SYH (عملکرد دانه در هکتار) و OY (عملکرد روغن).

Days to Flowering (DTF), Flowering Duration (FD), Days to Maturity (DTM), Seed Filling Period (SFP), Dormancy (DOR), Plant Height (PH) (cm), Head Height (HH) (cm), Stem Lodging (SL) (cm), Head Diameter (HD) (cm), Stem Diameter (SD) (mm), Thousand Seed Weight (TSW) (g), Seeds per Head (SPH), Oil Content (OC), Seed Yield per Hectare (SYH) (kg ha^{-1}), Oil Yield (OY) (kg ha^{-1}).

نتایج جدول ۳ در رابطه با توان ترکیب‌پذیری عمومی (GCA) لاین‌ها و تسترها، اثرات مثبت و منفی لاین‌ها و تسترها را بر صفات مختلف نشان می‌دهند. برای تعداد روز تا گلدهی، لاین ۲ (۰/۳۸۹) و لاین ۷ (۰/۶۱۱-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای مدت گلدهی، لاین ۲ (۰/۴۰۷) و لاین ۷ (۰/۴۲۶-) به ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای روز تا رسیدگی ، لاین ۸ (۲/۷۹۶) و لاین ۱ (۱/۳۷-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای دوره پر شدن دانه، لاین ۸ (۲/۵) و لاین ۱ (۱/۵-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای دوره خواب گیاه، لاین ۴ (۱/۵) و لاین ۱ (۱/۵-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای ارتفاع بوته، لاین ۳ (۸/۶۹۸) و لاین ۵ (۱۰/۴۱۴-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای ارتفاع طبق ، لاین ۶ (۸/۸۴۶) و لاین ۷ (۹/۲۰۹-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای خمیدگی ساقه، لاین ۷ (۱۱/۶۲۹) و لاین ۶ (۹/۵۰۶-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای قطر طبق، ، لاین ۲ (۰/۹۸۱) و لاین ۹ (۱/۱۳-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای قطر ساقه، لاین ۲ (۱/۲۶۵) و لاین ۱ (۱/۳۰۳-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای وزن هزار دانه، لاین ۵ (۱۰/۲۰۴) و لاین ۱ (۳/۶۳-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای تعداد دانه در طبق، لاین ۶ (۱۵۶/۱۴۷) و لاین ۱ (۱۶۷/۵۷-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای درصد روغن، لاین ۱ (۱/۰۶۳) و لاین ۵ (۱/۳۶۶-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای عملکرد دانه در هکتار، لاین ۲ (۳۹۰/۵۷۴) و لاین ۱ (۴۸۹/۴۲۶-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای عملکرد روغن، لاین ۲ (۲۱۲/۹۲۸) و لاین ۱ (۲۱۱/۱۰۹-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. در مورد تسترها، تستر ۲ برای اکثر صفات اثرات مثبت و تستر ۱ اثرات منفی داشت. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که لاین‌ها و تسترها اثرات متفاوتی بر صفات دارند و انتخاب ترکیب‌های مناسب لاین و تستر می‌تواند به بهبود صفات کمک کند.

نتایج این مطالعه نشان دادند که اثرات لاین‌ها و تسترها بر صفات مختلف متفاوت بودند و برخی لاین‌ها و تسترها اثرات مثبت یا منفی قوی‌تری بر صفات کلیدی مانند تعداد روز تا گلدهی، عملکرد دانه در هکتار و درصد روغن داشتند. اثرات مثبت و منفی لاین‌ها و تسترها بر صفات مختلف نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل توجه بین آن‌ها است. برای مثال، لاین ۲ و لاین ۸ به‌ترتیب بیشترین اثرات مثبت را بر تعداد روز تا گلدهی و دوره پر شدن دانه داشتند، که نشان می‌دهد این لاین‌ها می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی برای بهبود این صفات مورد استفاده قرار گیرند.

یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش شده توسط (Memon *et al*., 2015; Tan, 2010) مطابقت دارند، که نشان دادند برخی لاین‌ها و تسترها می‌توانند اثرات قوی‌تری بر صفات زراعی داشته باشند. برتری برخی لاین‌ها و تسترها در بهبود صفات کلیدی مانند عملکرد دانه در هکتار و درصد روغن نشان می‌دهد که استفاده از این ترکیب‌ها می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

جدول ۴- توانایی ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) لاین‌ها و تسترها برای صفات مورد مطالعه
Table 4. Specific Combining Ability (SCA) of Lines and Testers for the Studied Traits

OY	SYH	OC	SPH	TSW	SD	HD	SL	HH	PH	DOR	SFP	DTM	FD	DTF	Tester	Line
64.75	86.57	1.06	45.21	4.222	0.72	0.062	4.5	-0.544	7.191	0.833	0.17	1.4	0.19	1.056	1	1
-64.7	-86.57	-1.1	-45.21	-4.222	-0.72	-0.062	-4.5	0.544	-7.19	-0.83	-0.2	-1.4	-0.19	-1.056	2	1
-296	-571.4	-0.7	-115	-2.544	-1.28	-0.494	-1.82	1.345	-2.09	-2.17	0.17	-0.9	-0.82	-0.278	1	2
295.6	571.4	0.74	115	2.544	1.28	0.494	1.82	-1.345	2.086	2.167	-0.2	0.9	0.82	0.278	2	2
-71.9	-198.1	0.97	-40.4	-0.778	-0.21	-0.216	7.06	-8.877	-3.03	-0.67	0.83	-0.8	0.02	-1.611	1	3
71.86	198.1	-1	40.4	0.778	0.21	0.216	-7.06	8.877	3.031	0.667	-0.8	0.8	-0.02	1.611	2	3
-105	-157.9	-1.1	-56.89	0.356	-0.97	-0.272	-6.04	-2.483	-13.1	0.833	-2.3	-0.8	0.19	1.389	1	4
104.8	157.9	1.13	56.89	-0.356	0.97	0.272	6.04	2.483	13.09	-0.83	2.33	0.8	-0.19	-1.389	2	4
66.72	139.6	0.26	23.45	-0.811	-0.98	-0.716	-7.33	2.956	-5.48	-0.67	1.83	0.9	-0.15	-0.778	1	5
-66.7	-139.6	-0.3	-23.45	0.811	0.98	0.716	7.33	-2.956	5.475	0.667	-1.8	-0.9	0.15	0.778	2	5
394.3	726.2	1.66	156.6	2.822	0.84	0.701	7.76	-3.71	6.802	-2.17	-1.8	-2.4	-0.15	-0.444	1	6
-394	-726.2	-1.7	-156.6	-2.822	-0.84	-0.701	-7.76	3.71	-6.8	2.167	1.83	2.4	0.15	0.444	2	6
-8.7	-64.59	1.05	-39.6	1.122	-0.2	0.145	-0.13	-0.099	-2.03	2.333	1	1.7	0.02	0.722	1	7
8.699	64.59	-1	39.6	-1.122	0.2	-0.145	0.13	0.099	2.031	-2.33	-1	-1.7	-0.02	-0.722	2	7
104.7	299.9	-1.4	42.48	1.022	1.27	0.895	1.02	5.012	9.802	0.833	-1.2	-0.1	0.35	0.722	1	8
-105	-299.9	1.37	-42.48	-1.022	-1.27	-0.895	-1.02	-5.012	-9.8	-0.83	1.17	0.1	-0.35	-0.722	2	8
-150	-260.3	-1.8	-15.82	-5.411	0.82	-0.105	-5.03	6.401	1.914	0.833	1.33	0.9	0.35	-0.778	1	9
149.5	260.3	1.76	15.82	5.411	-0.82	0.105	5.03	-6.401	-1.91	-0.83	-1.3	-0.9	-0.35	0.778	2	9

صفات مورد بررسی عبارتند از: DTF (روز تا گلدهی)، FD (مدت گلدهی)، DTM (روز تا رسیدگی)، SFP (دوره پر شدن دانه)، DOR (دوره خواب گیاه)، PH (ارتفاع بوته)، HH (ارتفاع طبق)، SL (خمیدگی ساقه)، HD (قطر طبق)، SD (قطر ساقه)، TSW (وزن هزار دانه)، SPH (تعداد دانه در طبق)، OC (درصد روغن)، SYH (عملکرد دانه در هکتار) و OY (عملکرد روغن).

Days to Flowering (DTF), Flowering Duration (FD), Days to Maturity (DTM), Seed Filling Period (SFP), Dormancy (DOR), Plant Height (PH) (cm), Head Height (HH) (cm), Stem Lodging (SL) (cm), Head Diameter (HD) (cm), Stem Diameter (SD) (mm), Thousand Seed Weight (TSW) (g), Seeds per Head (SPH), Oil Content (OC), Seed Yield per Hectare (SYH) (kg ha^{-1}), Oil Yield (OY) (kg ha^{-1}).

نتایج جدول ۴ در ارتباط با توان ترکیبی خصوصی (SCA) برای ترکیب‌های مختلف لاین‌ها و تسترها، اثرات متقابل بین لاین‌ها و تسترها بر صفات مختلف را نشان می‌دهند. برای تعداد روز تا گلدهی، ترکیب لاین ۱ × تستر ۱ (۰۵۶/۱) بیشترین اثر مثبت و ترکیب لاین ۱ × تستر ۲ (۰۵۶/۱-) بیشترین اثر منفی را داشتند. برای مدت گلدهی، ترکیب لاین ۲ × تستر ۱ (۱۹/۰) و ترکیب لاین ۲ × تستر ۲ (۱۹/۰-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای روز تا رسیدگی، ترکیب لاین ۶ × تستر ۱ (۴/۲-) و ترکیب لاین ۶ × تستر ۲ (۴/۲) به‌ترتیب بیشترین اثر منفی و مثبت را داشتند. برای دوره پرشدن دانه، ترکیب لاین ۴ × تستر ۱ (۳/۲-) و ترکیب لاین ۴ × تستر ۲ (۳۳/۲) به‌ترتیب بیشترین اثر منفی و مثبت را نشان دادند. برای دوره خواب گیاه، ترکیب لاین ۶ × تستر ۱ (۱۶۷/۲) و ترکیب لاین ۶ × تستر ۲ (۱۶۷/۲-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای ارتفاع بوته، ترکیب لاین ۸ × تستر ۱ (۸۰۲/۹) و ترکیب لاین ۸ × تستر ۲ (۸/۹-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای ارتفاع طبق، ترکیب لاین ۶ × تستر ۱ (۷۱/۳-) و ترکیب لاین ۶ × تستر ۲ (۷۱/۳) به‌ترتیب بیشترین اثر منفی و مثبت را نشان دادند. برای خمیدگی ساقه، ترکیب لاین ۷ × تستر ۱ (۶۲۹/۱۱) و ترکیب لاین ۷ × تستر ۲ (۶۲۹/۱۱-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای قطر طبق، ترکیب لاین ۲ × تستر ۱ (۹۸۱/۰) و ترکیب لاین ۲ × تستر ۲ (۹۸۱/۰-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای قطر ساقه، ترکیب لاین ۵ × تستر ۱ (۹۸/۰-) و ترکیب لاین ۵ × تستر ۲ (۹۸/۰) به‌ترتیب بیشترین اثر منفی و مثبت را داشتند. برای وزن هزار دانه، ترکیب لاین ۵ × تستر ۱ (۲۰۴/۱۰) و ترکیب لاین ۵ × تستر ۲ (۲۰۴/۱۰-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای تعداد دانه در طبق، ترکیب لاین ۶ × تستر ۱ (۶/۱۵۶) و ترکیب لاین ۶ × تستر ۲ (۶/۱۵۶-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای درصد روغن، ترکیب لاین ۱ × تستر ۱ (۰۶/۱) و ترکیب لاین ۱ × تستر ۲ (۰۶/۱-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند. برای عملکرد دانه در هکتار، ترکیب لاین ۶ × تستر ۱ (۲/۷۲۶) و ترکیب لاین ۶ × تستر ۲ (۲/۷۲۶-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را داشتند. برای عملکرد روغن، ترکیب لاین ۲ × تستر ۱ (۹۲۸/۲۱۲) و ترکیب لاین ۲ × تستر ۲ (۹۲۸/۲۱۲-) به‌ترتیب بیشترین اثر مثبت و منفی را نشان دادند.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که اثرات متقابل بین لاین‌ها و تسترها (توان ترکیبی خصوصی یا SCA) برای اکثر صفات از نظر آماری بسیار معنادار است. برخی ترکیب‌های خاص، مانند لاین ۶ و تستر ۱، برای صفات کلیدی مانند تعداد دانه در طبق و عملکرد دانه در هکتار بیشترین اثر مثبت را داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که انتخاب ترکیب‌های مناسب لاین و تستر می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود صفات زراعی داشته باشد. اثرات متقابل قوی بین لاین‌ها و تسترها نقش مهم غالبیت ژنتیکی و اثرات غیر افزایشی را در کنترل صفات نشان می‌دهند. برای مثال، ترکیب لاین ۶ و تستر ۱ که بیشترین اثر مثبت را بر عملکرد دانه در هکتار داشت، می‌تواند ناشی از تعامل ژن‌های غالب و بیش‌غلبه باشد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که انتخاب ترکیب‌های مناسب لاین و تستر می‌تواند به بهبود عملکرد و کیفیت محصولات زراعی کمک کند. یافته‌های این مطالعه با نتایج گزارش شده توسط مطالعات قبلی مطابقت دارند. برای مثال، قمر Qamar (2015) در مطالعه‌ای بر روی آفتابگردان نشان داد که اثرات متقابل لاین و تستر توانست تأثیر قابل‌توجهی بر صفات زراعی مانند عملکرد و مقدار روغن داشته باشد. با این‌حال، در مطالعه‌ای

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

برخی ترکیب‌ها اثرات منفی قوی‌تری داشتند، که ممکن است ناشی از تفاوت در مواد ژنتیکی مورد استفاده یا شرایط محیطی باشد. این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که پاسخ ژنوتیپ‌ها به ترکیب‌های مختلف می‌تواند تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و محیطی قرار گیرد (Devi Dayal & Agarwal, 1999).

نتایج این مطالعه از این جهت حائز اهمیت هستند که ترکیب‌های خاصی مانند لاین ۶ و تستر ۱ می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه ارقام جدید با عملکرد و کیفیت بهتر مورد استفاده قرار گیرند. این ترکیب‌ها می‌توانند به افزایش عملکرد دانه در هکتار، بهبود درصد روغن، و کاهش دوره رشد گیاه کمک کنند، که برای کشاورزان از نظر اقتصادی بسیار مهم است. همچنین، استفاده از این ترکیب‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری در سیستم‌های کشاورزی منجر شود. اگرچه این مطالعه نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داد، اما محدودیت‌هایی مانند تعداد محدود لاین‌ها و تسترهای مورد استفاده وجود دارند. پیشنهاد می‌شود که تنوع ژنتیکی بیشتری در مطالعات آینده در نظر گرفته شود و اثرات محیطی نیز بررسی شوند. همچنین، انجام مطالعات تکمیلی برای بررسی مکانیسم‌های ژنتیکی پایه‌ای این صفات می‌تواند به درک بهتر این تعاملات کمک کند. استفاده از تکنیک‌های مولکولی، مانند مارکرهای مولکولی و توالی‌یابی ژنوم، می‌تواند به شناسایی ژن‌های مسئول این صفات کمک کند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که هر دو نوع ترکیب‌پذیری خصوصی (SCA) و عمومی (GCA) تأثیر معنی‌داری بر صفات زراعی دارند. ترکیب لاین ۶ و تستر ۱ بیشترین اثر مثبت را بر تعداد دانه و عملکرد دانه نشان داد، درحالی که ترکیب لاین ۱ و تستر ۲ اثرات منفی داشت. از نظر توان ترکیب‌پذیری عمومی، لاین ۲ برای بهبود زمان گلدهی و لاین ۸ برای دوره پر شدن دانه مناسب‌ترین بودند.

تحلیل واریانس نشان داد که اثرات متقابل لاین × تستر برای اکثر صفات از جمله قطر ساقه و ارتفاع بوته بسیار معنی‌دار بودند. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب هوشمندانه ترکیب والدین در برنامه‌های اصلاحی تأکید دارند و می‌توانند منجر به توسعه ارقام پربازده و پایدار آفتابگردان شوند. نتایج این پژوهش کاربرد عملی در افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید دارند.

References

Ahmed, M., Noaman, H. M., & Zahran, H. (2022). Combining ability estimation for yield and its components of sunflower inbred lines. *Egyptian Journal of Chemistry, 65*(3), 19-28.

Andarkhor, S. A., Mastibege, N., & Rameeh, V. (2012). Combining ability of agronomic traits in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) using line X tester analysis. *International Journal of Biology,* 4(1), 89.

Arshad, A., Iqbal, M., Farooq, S., & Abbas, A. (2024). Genetic evaluation for seed yield and its component traits in sunflower (*Helianthus annuus* l.) using line× tester approach. *Bulletin of Biological and Allied Sciences Research,* 2024(1), 63-63.

Attia, M. A. (2020). Combining Ability of Agronomic Traits in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Through Line x Tester. *Journal of Environmental Studies,* 22(1), 1-12.

De Mendiburu, F., & Simon, R. (2015). *Agricolae-Ten Years of an Open Source Statistical Tool for Experiments in Breeding, Agriculture and Biology* (2167-9843).

Devi Dayal, D. D., & Agarwal, S. (1999). Response of sunflower genotypes (*Helianthus annuus*) to nutrient management. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 69(1), 10-13.

Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., Bouzerzour, H., & Boutekrabt, A. (2013). Line× tester mating design analysis for grain yield and yield related traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agronomy, 2013*(1), 201851.

Ghaffari, M., Andarkhor, S. A., Homayonifar, M., Kalantar Ahmadi, S. A., Shariati, F., Jamali, H., & Rahmanpour, S. (2020). Agronomic attributes and stability of exotic sunflower hybrids in Iran. *Helia, 43*(72), 67-81.

Henderson, W. (1952). A comparison of different routes of inoculation of cattle for detection of the virus of foot-and-mouth disease. *Epidemiology & Infection, 50*(2), 182-194.

Kazemi, Z., Neyshabouri, M., Zaree Haghi, D., & Asgarzadeh, H. (2018). Determination of the least limiting water range based on sunflower plant response. *Iranian Journal of Soil Research, 32*(2), 165-176.

Labroo, M. R., Studer, A. J., & Rutkoski, J. E. (2021). Heterosis and hybrid crop breeding: a multidisciplinary review. *Frontiers in Genetics, 12*, 643761.

Lakshman, S., Chakrabarty, N., & Kole, P. (2019). Study on the combining ability and gene action in sunflower through line x tester matting design. *Electronic Journal of Plant Breeding, 10*(2), 816-826.

Memon, S., Baloch, M. J., Baloch, G. M., & Jatoi, W. A. (2015). Combining ability through line× tester analysis for phenological, seed yield, and oil traits in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Euphytica, 204*, 199-209.

Miller, J. F., & Fick, G. N. (1997). The genetics of sunflower. *Sunflower Technology and Production, 35*, 441-495.

Mohammadi, F., Fazeli, A., Zareei Siahbidi, A., & Rezaeei Zad, A. (2021). Evaluation of General and Specific Combining Ability of Some Sunflower Inbred Lines under Normal and Drought Stress Condition. *Journal of Crop Breeding, 13*(40), 113-121. [In Persian]

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]

Razzaq, H., Hafeez, T., & Ali, A. (2023). Heterosis and Combining Ability Analysis in Sunflower Through Line× Tester Breeding Scheme. *International Journal of Agricultural and Applied Sciences* 4(2), 81-85.

Rehman, A., Aguiar, R. L., & Barraca, J. P. (2021). Testing virtual network functions auto-scaling using open-source management and orchestration. 2021 Telecoms Conference (ConfTELE).

Saleem, U., Khan, M., Gull, S., Usman, K., Saleem, F., & Siyal, O. (2014). Line× tester analysis of yield and yield related attributes in different sunflower genotypes. *Pakistan Journal of Botany, 46*(2), 659-665.

Shelke, P., Pole, S., Dhuppe, M., Gund, M., & SP, U. (2024). Genetic Analysis of Combining Ability and Gene Action in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Hybrids through Line× Tester Design. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology,* 27(10), 1208-1221.

Tan, A. (2010). Study on the determination of combining abilities of inbred lines for hybrid breeding using line× tester analysis in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Helia, 33*(53), 131-148.

Yin, X., Struik, P. C., van Eeuwijk, F. A., Stam, P., & Tang, J. (2005). QTL analysis and QTL-based prediction of flowering phenology in recombinant inbred lines of barley. *Journal of Experimental Botany, 56*(413), 967-976.

[Downloaded from jcb.sanru.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.66224/jcb.2026.1618]