Vol. 7, No. 2, Autumn & Winter, 2026, p. 181-200

Plant Production and Genetics

https://doi.org/ 10.22034/plant.2026.145211.1189

Evaluation of genetic diversity and drought tolerance in safflower genotypes based on morphological traits and seed yield in Hamedan

Morvarid Salehi[1], Elaheh fayyaz[1]*, Mohammad Reza Abdollahi[1], Seyyed Saeed Moosavi[1]

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
*Corresponding Author Email: e.fayyaz@basu.ac.ir

Received: 24-01-2026 **revised:** 19-05-2026 **Accepted:** 31-05-2026

Abstract

Introduction: Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) is a drought-tolerant crop valued for its high-quality edible oil and natural colorants in various industries. Its adaptability to semi-arid climates and multipurpose utilization of plant biomass position it as a strategic crop for sustainable agriculture in water-limited regions. The objective of this study was to investigate the effect of water-deficit stress on the agronomic traits of safflower, identify tolerant and susceptible genotypes, and determine the key traits associated with tolerance to this type of stress.

Materials and Methods: This study investigated the effects of terminal drought stress on yield components, seed and oil yield, and drought-related morphological traits in promising safflower genotypes. The experiment was conducted as a split-plot arrangement within a randomized complete block design (RCBD) with three replications at the research fields of Bu-Ali Sina University, Hamedan, during the 2022–2023 growing season. The main factor consisted of two irrigation regimes: well-watered (control) and terminal drought stress (imposed from flowering to seed maturity). The sub-plot factor comprised five safflower genotypes: Sofeh, Amir, Parnian, Zis-chini, and Goldasht.

Results: The analysis of variance (ANOVA) results showed that the irrigation regime had a statistically significant effect on all morphological traits (except leaf area), oil percentage, and yield-related traits. The genotype × irrigation regime interaction was significant for plant height, number of lateral branches, capitulum diameter, and oil percentage, indicating differential genotypic responses to water deficit stress. Mean comparison analysis demonstrated that the genotype Sofeh exhibited the greatest grain yield stability, with yields of 341 $g.m^{-2}$ under full irrigation and 315 $g.m^{-2}$ drought stress (7.6% reduction). In contrast, although the genotype Parnian possessed a high initial oil content (44.6%), it experienced a substantial decline to 32.7% under water deficit conditions. Thousand-seed weight and the weight of 20 capitula were identified as stable traits across irrigation treatments. Thousand-seed weight and the weight of 20 capitula were identified as stable traits across irrigation treatments. The genotype Sofeh maintained stem diameter, leaf area, and total capitulum weight, demonstrating superior efficiency in resource allocation toward reproductive organs. Overall, Sofeh was identified as a late-season drought-tolerant genotype, owing to its combination of high yield, stable oil content, and minimal reduction in yield components. Under well-watered treatment, grain yield was positively correlated with biomass, capitulum weight, plant height, and oil content, whereas 1000-grain weight showed negative correlations with structural traits, indicating a trade-off between vegetative growth and grain filling. Under terminal drought stress, these relationships underwent a shift, with grain yield becoming negatively correlated with oil content, reflecting a competition between grain quantity and quality under limited water availability. Furthermore, factor analysis based on pooled data from both well-watered and stress conditions extracted three factors with eigenvalues greater than one, collectively accounting for 77.7% of the total variation in the dataset. Factor 1 (38.9% of variance) was interpreted as a yield and overall production potential factor; Factor 2 (19.8% of variance) represented a vegetative and morphological traits factor; and Factor 3 (18.9% of variance) was designated as a seed and capitulum size factor.

Conclusion: Owing to its high yield potential, superior performance stability under water deficit, and relative resilience in maintaining oil content, the Sofeh genotype is recommended as the most promising candidate for cultivation in water-limited regions and as a parental line in breeding programs aimed at developing drought-tolerant safflower cultivars. Furthermore, the findings underscore that simultaneous selection for high yield, optimal seed size, and stable oil content under drought conditions necessitates the application of multi-trait selection indices and careful consideration of genotype × environment interactions.

Keywords: *Carthamus tinctorius* L., Correlation analysis, Factor analysis, Terminal drought stress, Yield stability

Citation: Salehi, M., Fayyaz, E., Abdollahi., M. R., & Moosavi, S. S. (2026). Evaluation of genetic diversity and drought tolerance in safflower genotypes based on morphological traits and seed yield in Hamedan. *Plant Production and Genetics*, *7*(2), 181-200. https://doi.org/ 10.22034/plant.2026.145211.1189

Copyrights:
Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. 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.

جلد ۷، شماره۲، پاییز و زمستان، ۱۴۰۵، صفحات ۲۰۰-۱۸۱

تولید و ژنتیک گیاهی

https://doi.org/ 10.22034/plant.2026.145211.1189

بررسی تنوع ژنتیکی و تحمل به کم‌آبی ژنوتیپ‌های گلرنگ بر اساس صفات مورفولوژیک و عملکرد دانه در همدان

مروارید صالحی[۱]، الهه فیاض*[۱]، محمدرضا عبداللهی[۱]، سید سعید موسوی[۱]

۱. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: e.fayyaz@basu.ac.ir

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۱۱/۰۴ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۵/۰۲/۲۹ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

چکیده

مقدمه: گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) گیاهی مقاوم به کم‌آبی است که به‌عنوان منبع روغن خوراکی سالم و رنگ‌دهنده طبیعی در صنایع مختلف کاربرد دارد. سازگاری با اقلیم‌های نیمه‌خشک و استفاده چندمنظوره از اجزای گیاه، آن را به گزینه‌ای استراتژیک برای کشاورزی پایدار در مناطق کم‌آب تبدیل کرده است. هدف این پژوهش، بررسی اثر تنش کم‌آبی بر صفات زراعی گلرنگ، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس، و تعیین صفات کلیدی مرتبط با تحمل به این نوع تنش بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، اثرات کم‌آبی انتهایی فصل بر عملکرد دانه و اجزای آن، صفات مورفولوژیک و درصد روغن در پنج ژنوتیپ امیدبخش گلرنگ بررسی شد. آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار، در اراضی تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان طی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا شد. عامل اصلی شامل دو سطح تنش کم‌آبی شامل آبیاری کامل و تنش کم‌آبی از گلدهی تا رسیدگی دانه و عامل فرعی پنج ژنوتیپ گلرنگ شامل ژنوتیپ‌های صفه، امیر، پرنیان، زیس‌چینی و گلدشت بودند.

نتایج: نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر رژیم آبیاری بر تمامی صفات مورفولوژیک (به‌استثنای سطح برگ)، درصد روغن و عملکردی از نظر آماری معنی‌دار بود. برهمکنش ژنوتیپ × رژیم آبیاری برای ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، قطر غوزه و درصد روغن معنی‌دار شد که بیانگر پاسخ متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش است. مقایسه میانگین‌ها نشان داد ژنوتیپ صفه با عملکرد ۳۴۱ گرم بر مترمربع در شرایط آبیاری کامل و ۳۱۵ گرم بر مترمربع تحت تنش (کاهش ۷/۶ درصدی)، برترین پایداری عملکرد دانه را داشت. درمقابل، ژنوتیپ پرنیان باوجود درصد روغن اولیه بالا (۴۴/۶ درصد)، تحت تنش کم‌آبی کاهش تا میزان ۳۲/۷ درصد نشان داد. وزن هزار دانه و وزن ۲۰ غوزه از صفات پایدار بودند. ژنوتیپ صفه با حفظ قطر ساقه، سطح برگ و وزن کل غوزه، کارایی بالاتری در تخصیص منابع به اندام‌های زایشی نشان داد. در مجموع، ژنوتیپ صفه به‌دلیل ترکیب عملکرد بالا، پایداری درصد روغن و کاهش حداقلی در اجزای عملکرد، به‌عنوان ژنوتیپ متحمل به تنش کم‌آبی آخر فصل شناسایی شد. در شرایط آبیاری کامل، عملکرد دانه با زیست‌توده، وزن غوزه، ارتفاع بوته و درصد روغن همبستگی مثبت داشت، اما وزن هزار دانه با صفات ساختاری گیاه رابطه منفی نشان داد که بیانگر مبادله بین رشد رویشی و پرشدگی دانه است. تحت تنش کم‌آبی، این روابط دستخوش تغییر شد و همبستگی عملکرد دانه با درصد روغن منفی گردید که حاکی از رقابت بین کمیت و کیفیت دانه در شرایط محدودیت آب است. همچنین تجزیه به عامل‌ها براساس داده‌های ادغام شده شرایط آبی و تنش، سه عامل با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک را شناسایی کرد که در مجموع ۷۷/۷ درصد از تغییرات کل داده‌ها را تبیین نمودند. عامل اول (۳۸/۹ درصد) به‌عنوان عامل عملکرد و پتانسیل تولید کلی، عامل دوم (۱۹/۸ درصد) به‌عنوان عامل صفات رویشی و مورفولوژیکی و عامل سوم (۱۸/۹ درصد) به‌عنوان عامل اندازه دانه و غوزه شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: با توجه به پتانسیل تولید بالا، پایداری عملکرد تحت تنش کم‌آبی و مقاومت نسبی در کاهش درصد روغن، ژنوتیپ صفه به‌عنوان برترین ژنوتیپ برای کشت در مناطق کم‌آب و استفاده در برنامه‌های اصلاحی جهت توسعه ارقام متحمل به کم‌آبی معرفی می‌گردد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که گزینش همزمان در گلرنگ برای عملکرد، اندازه دانه و درصد روغن تحت تنش، مستلزم به‌کارگیری شاخص‌های چندصفتی و توجه به برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط است.

کلید واژگان: پایداری عملکرد، تنش کم‌آبی، تجزیه به عامل‌ها، ضریب همبستگی،گلرنگ

منبع: صالحی، م.، فیاض، ا.، عبداللهی، م. ر. و موسوی، س. س. (۱۴۰۵). بررسی تنوع ژنتیکی و تحمل به کم‌آبی ژنوتیپ‌های گلرنگ بر اساس صفات مورفولوژیک و عملکرد دانه در همدان. *مجله تولید و ژنتیک گیاهی*، ۷(۲)، ۲۰۰-۱۸۱. https://doi.org/ 10.22034/plant.2026.145211.1189

CC BY

مقدمه

تغییرات اقلیمی، تشدید بحران منابع آبی و افزایش دما از مهم‌ترین چالش‌های فراروی کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران محسوب می شوند. این عوامل نه‌تنها تولید محصولات زراعی را با محدودیت مواجه ساخته، بلکه امنیت غذایی و تعادل واردات روغن‌های خوراکی را نیز تهدید می‌کنند (Acevedo *et al*., 2020). مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که کاهش ۱۵ تا ۳۰ درصدی بارندگی در مناطق نیمه‌خشک ایران تا سال ۲۰۵۰، فشار بر منابع آبی زیرزمینی را تشدید خواهد کرد (Kang *et al*., 2024; Alkhedir & Taniguchi, 2024). در این راستا، توسعه کشت دانه‌های روغنی متحمل به کم‌آبی و کم‌آب‌بر نظیر گلرنگ به‌عنوان راهبردی کارآمد جهت کاهش فشار بر سفره‌های آبی، تنوع‌بخشی به الگوی کشت و تأمین بخشی از نیاز داخلی روغن مطرح است (Belikina & Sukhareva, 2021; Raeisi *et al*., 2020; Mulugeta *et al*., 2023).

گلرنگ، گیاهی یک‌ساله از تیره کاسنیان (Asteraceae)، به‌دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای عمیق، تحمل بالای کم‌آبی و شوری، نیاز آبی پایین و کیفیت مطلوب روغن، گزینه‌ای ایده‌آل برای کشت در اراضی دیم و کم‌بازده به شمار می‌رود (FAO, 2022; Khalid *et al*., 2017). تولید جهانی دانه این محصول حدود یک میلیون تن برآورد شده و در رتبه ششم دانه‌های روغنی جهان قرار دارد (FAO, 2022). دانه گلرنگ حاوی حدود ۳۵ درصد روغن و ۲۰ درصد پروتئین است و به‌دلیل غلظت بالای اسید لینولئیک، از کیفیت تغذیه‌ای و صنعتی هم‌تراز با روغن آفتابگردان برخوردار است (Kammili & Yadav, 2022). افزون بر این، تنوع ژنتیکی گسترده در ژرم‌پلاسم گلرنگ، پتانسیل بالایی را برای بهنژادی جهت بهبود عملکرد، ارتقای کیفیت روغن و افزایش تحمل به تنش‌های محیطی فراهم کرده است (Ojaq *et al*., 2020; Zhan *et al*., 2022; Yang *et al*., 2025).

مطالعات اخیر نقش تعیین‌کننده صفات مورفولوژیک را در تعیین عملکرد دانه و محتوای روغن گلرنگ تأیید کرده‌اند، هرچند شدت و جهت این همبستگی‌ها تحت تأثیر ترکیب ژنتیکی و شرایط محیطی متغیر است (Sajid *et al*., 2024). ارتفاع بوته اغلب همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه و درصد روغن نشان داده و در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان معیار گزینش غیرمستقیم برای دستیابی به عملکرد بالاتر پیشنهاد شده است (Koç, 2021; Shekari *et al*., 2025). بااین حال، پژوهش های جدید نشان می‌دهند که شاخص‌های فیزیولوژیک غیر مخرب مانند دمای تاج‌پوشه، محتوای آب نسبی برگ و کارایی مصرف آب، دقت گزینش ژنوتیپ‌های متحمل را تحت تنش کم‌آبی افزایش می‌دهند (Manikanta *et al*., 2023; Salami *et al*., 2025). تعداد غوزه در بوته نیز به‌عنوان یکی از اجزای اصلی عملکرد، همبستگی قوی با عملکرد دانه و روغن دارد و در تحلیل‌های چندمتغیره و ضرایب مسیر، بیشترین سهم مستقیم و غیرمستقیم را در تبیین تغییرات عملکرد ایفا می‌کند؛ ازاین‌رو، شاخصی قابل‌اتکا برای گزینش در نسل‌های اولیه به‌نژادی محسوب می‌شود (Sajid *et al*., 2024; Ali *et al*., 2024). وزن هزار دانه و قطر غوزه نیز با همبستگی مثبت معنی‌دار با عملکرد، از تعیین‌کننده‌های کلیدی عملکرد نهایی به شمار می‌روند. همچنین، سطح برگ و قطر ساقه به‌ترتیب به‌عنوان شاخص‌های ظرفیت فتوسنتزی و پایداری ساختاری (مقاومت به ورس)، در تحلیل‌های مؤلفه‌های اصلی بار عاملی بالایی داشته و ارزش گزینشی آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی تأیید شده است (Ojaq *et al*., 2020; Karami *et al*., 2024).

با این‌وجود، تنش کم‌آبی به‌عنوان محدودکننده‌ترین عامل غیر زیستی در تولید گلرنگ شناخته می‌شود که تأثیرات مخرب آن بر رشد رویشی و اجزای عملکرد به‌طور گسترده‌ای مستند شده است (*Joshan et al*., 2020; Mohammadi *et al*., 2018; Yeloojeh *et al*., 2020). کم‌آبی در مراحل رویشی منجر به کاهش ارتفاع بوته، سطح برگ و شاخص سطح برگ می‌گردد، درحالی‌که وقوع آن در مراحل زایشی و به‌ویژه دوره پُر شدن دانه، وزن هزار دانه، عملکرد نهایی و سنتز روغن را به‌شدت کاهش می‌دهد (Joshan *et al*., 2020). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنش کم‌آبی در مرحله پُر شدن دانه گلرنگ، عملکرد دانه را عمدتاً از طریق کاهش فتوسنتز، اختلال در انتقال آسیمولات‌ها و تسریع پیری برگ‌ها کاهش می‌دهد (Shahrokhnia *et al*., 2020; Karami *et al*., 2024). شدت این کاهش به‌شدت تنش، زمان وقوع و سازگاری ژنوتیپ بستگی دارد (Oddo *et al*., 2020). به‌ویژه، تنش کم‌آبی در مرحله گلدهی و پس‌ازآن به‌دلیل تداخل با فرآیندهای

حساس گرده‌افشانی، انتقال مواد فتوسنتزی و تجمع روغن، بیشترین خسارت را به تعداد دانه در غوزه، وزن هزار دانه و درصد روغن وارد می‌سازد (Eslam *et al*., 2010; Joshan *et al*., 2020). مطالعات متابولومیک و بیوشیمیایی اخیر نشان داده‌اند که تنش کم‌آبی آخر فصل با مهار آنزیم‌های کلیدی بیوسنتز لیپید مانند استیل-کوآ کربوکسیلاز و دسچورازهای اسید چرب، اختلال در انتقال آسیمولات‌ها به چاهک‌های زایشی و تسریع پیری برگ‌ها، درصد روغن و کیفیت اسیدهای چرب را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zafari *et al*., 2020; Harsha *et al*., 2024; Karami *et al*., 2024).

اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی پاسخ گلرنگ به تنش کم‌آبی پرداخته‌اند، اکثر آن‌ها تمرکز خود را بر تنش مداوم در کل دوره رشد یا محدودیت آبی در مراحل رویشی معطوف داشته‌اند. درحالی‌که در شرایط واقعی مزارع مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران (ازجمله استان همدان)، محدودیت شدید آب اغلب به‌صورت تنش کم‌آبی آخر فصل (پس از گلدهی) رخ می‌دهد. در این شرایط، کشاورزان به‌دلیل هزینه‌های بالای آبیاری تکمیلی، معمولاً از تأمین آب در این مرحله صرف‌نظر می‌کنند. ازآنجاکه این نوع تنش دقیقاً هم‌زمان با مرحله بحرانی پُرشدن دانه و بیوسنتز روغن است، خسارات جبران‌ناپذیری بر کمّیت و کیفیت محصول وارد می‌کند؛ بااین‌حال، ارزیابی جامع و هدفمند واکنش ژنوتیپ‌های گلرنگ به تنش کم‌آبی آخر فصل و تأثیر آن بر پویایی صفات مورفولوژیک، اجزای عملکرد و محتوای روغن همچنان با خلأ پژوهشی مواجه است. بر این اساس، فرضیه حاضر بر آن است که ژنوتیپ‌های گلرنگ پاسخ‌های متمایزی به تنش کم‌آبی آخر فصل نشان می‌دهند و برخی ژنوتیپ‌ها با حفظ کارآمدتر صفات مورفولوژیک کلیدی، قادر به حفظ عملکرد دانه و روغن پایدارتری خواهند بود. لذا، پژوهش حاضر باهدف ارزیابی واکنش پنج ژنوتیپ گلرنگ به تنش کم‌آبی آخر فصل (قطع آبیاری پس از گلدهی) در شرایط مزرعه‌ای در شهر همدان طراحی شد. اهداف اصلی این مطالعه شامل بررسی تأثیر تنش بر صفات مورفولوژیک، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و درصد روغن، شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل و حساس، و تعیین صفات کلیدی مرتبط با تحمل به این نوع تنش بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور ارزیابی پاسخ پنج ژنوتیپ گلرنگ به تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینا واقع در همدان اجرا شد. ژنوتیپ های موردمطالعه شامل امیر، پرنیان، زیس چینی، صفه اصفهان و گلدشت بودند که از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) تهیه گردیدند. آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد؛ به‌طوری‌که کرت‌های اصلی به دو سطح آبیاری (آبیاری مطلوب در طول فصل رشد و تنش کم‌آبی پس از گلدهی) و کرت‌های فرعی به پنج ژنوتیپ اختصاص یافت. پیش از کشت، نمونه‌برداری مرکب خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری انجام و نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس آزمون خاک و با توجه به کمبود نیتروژن قابل‌جذب، کود اوره بر اساس توصیه کارشناسی در یک نوبت در مرحله رشد رویشی مصرف شد. کاشت بذرها در ۲۲ فروردین ۱۴۰۲ با فاصله ردیف ۵۰ و فاصله بوته ۱۰ سانتی‌متر انجام گرفت. آبیاری با استفاده از سیستم قطره‌ای (نوار تیپ) صورت پذیرفت. در تیمار تنش کم‌آبی، آبیاری پس از مرحله گلدهی تمام ژنوتیپ‌ها قطع گردید. مدیریت علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد و در صورت نیاز از علف‌کش‌های سازگار با گلرنگ استفاده گردید. صفات مورفولوژیک و زراعی مورد ارزیابی در جدول ۲ فهرست شده‌اند. برداشت در ۲۸ مرداد ۱۴۰۲ انجام و عملکرد دانه و زیست‌توده هوایی هر ژنوتیپ به‌طور مجزا اندازه‌گیری شد. درصد روغن دانه نیز به روش استاندارد سوکسله استخراج گردید (Johnson & Ulrich, 1959).

پیش از تجزیه واریانس، نرمال بودن داده‌ها و باقیمانده‌ها با آزمون شاپیرو- ویلکس بررسی شد. تجزیه واریانس با استفاده از رویه GLM نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) برای آزمایش کرت های خردشده در قالب بلوک های کامل تصادفی انجام گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد صورت پذیرفت. همبستگی‌های پیرسون بین صفات با در محیط نرم‌افزار R با بسته گرافیکی ggally محاسبه شد. همچنین، به منظور بررسی روابط صفات مورد مطالعه، تجزیه به عامل‌ها به کمک نرم‌افزار XLSTAT انجام پذیرفت.

جدول ۱- خصوصیات خاک مزرعه

هدایت الکتریکی (dS/m)	pH	کربن آلی (درصد)	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)	درصد ازت کل (درصد)	آزمایش فیزیکی			نوع خاک	بافت خاک
						درصد رس	درصد سیلت	درصد شن		
۱/۴	۷/۷	۰/۷	۱۷	۱۵۱	۰/۰۷	۲۰	۲۰	۶۰	متوسط رو به سبک	شنی لومی

جدول ۲- صفات موردمطالعه در پژوهش

ردیف	صفت	اختصار	واحد اندازه‌گیری
۱	ارتفاع بوته	PH	سانتی‌متر
۲	طول برگ	LL	سانتی‌متر
۳	عرض برگ	LW	سانتی‌متر
۴	سطح برگ	LA	سانتی‌متر
۵	تعداد شاخه جانبی	NBP	عدد
۶	قطر ساقه	SD	سانتی‌متر
۷	قطر غوزه	HD	سانتی‌متر
۸	وزن ۲۰ غوزه	TPW	گرم
۹	وزن کل غوزه	THW	گرم
۱۰	وزن زیست‌توده	TWF	گرم
۱۱	وزن هزار دانه	TGW	گرم
۱۲	عملکرد دانه	TGP	گرم
۱۳	میزان روغن	OSP	گرم

نتایج و بحث

تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک پنج ژنوتیپ گلرنگ تحت شرایط تنش کم‌آبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت دو رژیم آبی (آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از گلدهی) و پنج رقم نشان داد که اثر رژیم آبیاری بر صفات موردبررسی شامل ارتفاع بوته، طول و عرض برگ، تعداد شاخه جانبی، قطر ساقه و قطر غوزه در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود که بیانگر تأثیر منفی و قابل‌توجه تنش کم‌آبی بر رشد رویشی ژنوتیپ‌های گلرنگ بود؛ به‌طوری‌که بیشترین حساسیت مربوط به ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های جانبی و قطر غوزه مشاهده شد (جدول ۳). اثر ژنوتیپ نیز بر اکثر صفات به غیر از طول برگ در سطوح آماری معنی‌دار بود که حاکی از وجود تنوع ژنتیکی قابل‌توجه بین ژنوتیپ‌های موردمطالعه است. از سوی دیگر، اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبی بر سه صفت کلیدی ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی و قطر غوزه معنی‌دار گردید که نشان‌دهنده پاسخ متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش کم‌آبی از نظر این صفات است و بیانگر آن است که برخی ژنوتیپ‌ها توانایی بهتری در حفظ رشد رویشی تحت شرایط کم‌آبی دارند. درمقابل، اثر متقابل بر صفات طول، عرض، سطح برگ و قطر ساقه معنی‌دار نشد که حاکی از الگوی پاسخ مشابه ژنوتیپ‌ها به تنش برای این صفات است. ضرایب تغییرات محاسبه‌شده برای صفات مختلف در محدوده ۳/۱۶ تا ۸/۸۸ درصد قرار داشت که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول آزمایش و کنترل مناسب عوامل برهم‌زننده در اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورفولوژیکی ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات						
		ارتفاع بوته	طول برگ	عرض برگ	سطح برگ	تعداد شاخه‌های جانبی	قطر ساقه	قطر غوزه
بلوک	۲	۲/۳۰^{ns}	۱/۰۲*	۰/۰۹۸*	۳/۳۴^{ns}	۰/۰۲^{ns}	۰/۰۰۶*	۰/۱۳^{ns}
رژیم آبیاری	۱	۱۳۴/۸۳***	۱/۶۹**	۰/۲۷*	۴/۴۰^{ns}	۱۸/۸۸***	۰/۰۱**	۱/۷۹***
خطای کرت اصلی	۲	۶/۷۴	۰/۰۴۳	۰/۰۰۶	۳/۶۲	۲/۸۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲
ژنوتیپ	۴	۵۲۶/۵۱***	۰/۲۰^{ns}	۰/۰۷۷*	۴/۳۸*	۱۶/۶۷***	۰/۰۰۶*	۰/۲۵*
ژنوتیپ × رژیم آبیاری	۴	۱۶/۵۷*	۰/۳۵^{ns}	۰/۰۲۸^{ns}	۱/۱۵^{ns}	۶/۷۷***	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۳۵**
خطای کرت فرعی	۱۶	۴/۹۴	۰/۲۵	۰/۰۲۲	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۰۰۱	۰/۰۶
ضریب تغییرات(٪)		۳/۱۶	۹/۲۱	۶/۹۷	۸/۸۸	۸/۳۹	۶/۲۲	۷/۷۸

^{ns}، *، **، *** : به‌ترتیب: عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال آماری ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

تجزیه واریانس صفات درصد روغن، عملکرد و صفات وابسته به آن پنج ژنوتیپ گلرنگ تحت شرایط تنش کم‌آبی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیم آبیاری بر وزن کل غوزه، وزن زیست‌توده، وزن هزار دانه، درصد روغن و عملکرد کل دانه در سطوح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ معنی‌دار بود (جدول ۴)، درحالی‌که تأثیر آن بر وزن ۲۰ غوزه معنی‌دار نشد؛ این یافته حاکی از آن است که محدودیت آبی به‌طور مستقیم بر تجمع زیست‌توده، پُرشدگی دانه‌ها و عملکرد نهایی تأثیر منفی دارد، اما احتمالاً به‌دلیل مکانیسم‌های جبرانی یا الگوی توزیع متفاوت مواد فتوسنتزی، تغییرات وزن غوزه در دامنه آماری معنی‌دار قرار نگرفته است. از سوی دیگر، اثر ژنوتیپ بر برخی صفات کمّی موردبررسی ازجمله وزن ۲۰ غوزه، وزن کل غوزه، وزن زیست‌توده، وزن هزار دانه و عملکرد کل دانه در سطح احتمال ۰/۰۰۱ معنی‌دار بود که بیانگر وجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌های موردمطالعه از نظر پتانسیل رشد، تولید غوزه و عملکرد دانه است. درمقابل، عدم معنی‌داری اثر ژنوتیپ بر درصد روغن نشان می‌دهد که این صفت کیفی احتمالاً تحت کنترل ژنتیکی پایدارتری قرار دارد یا تحت تأثیر تعاملات ژنوتیپ × محیط پیچیده‌تری است. اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبیاری تنها بر درصد روغن در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار شد که نشان می‌دهد پاسخ ژنوتیپ‌های مختلف به تنش کم‌آبی از نظر درصد روغن یکسان نبوده و برخی ژنوتیپ‌ها توانایی بهتری در حفظ یا حتی افزایش درصد روغن تحت شرایط تنش دارند؛ همچنین عدم معنی‌داری این اثر متقابل در سایر صفات نیز بیانگر آن است که اگرچه ژنوتیپ‌ها از نظر میانگین عملکردی متفاوت‌اند، اما الگوی کاهش صفات کمّی تحت تنش آبیاری بین آن‌ها مشابه است. ضرایب تغییرات گزارش‌شده برای صفات مختلف بین ۳/۸۲ تا ۱۵/۶۴ درصد متغیر بود که نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول طرح آزمایشی و کنترل مناسب خطاهای محیطی است. به‌ویژه ضریب تغییرات پایین برای وزن هزار دانه (۳/۸۲ درصد) بیانگر پایداری بالای این صفت در شرایط این آزمایش می‌باشد. در مجموع، نتایج تأیید می‌کند که مدیریت آبیاری و غربالگری ژنوتیپ‌های برتر می‌تواند راهبردی مؤثر برای حفظ عملکرد کمّی و ارتقای کیفیت دانه تحت شرایط کم‌آبی باشد و با توجه به معنی‌داری اثر متقابل بر درصد روغن، ارزیابی ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش برای معرفی ارقام متحمل با پروفایل روغنی مطلوب ضروری به نظر می‌رسد.

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات درصد روغن، عملکرد و صفات وابسته به آن ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن ۲۰ غوزه	وزن کل غوزه	وزن زیست‌توده	وزن هزار دانه	درصد روغن	عملکرد کل دانه
بلوک	۲	۰/۲۳ ns	۱۳۴۸ ns	۲۹۵۴ ns	۱/۱۰ ns	۰/۱۹ ns	۱۰۰/۲۳ ns
رژیم آبیاری	۱	۱۳/۳۳ ns	۱۹۲۳۲۰ ***	۹۲۱۸۵ **	۹۵/۴۹ ***	۹۱ **	۵۳۰۶ **
خطای کرت اصلی	۲	۸/۰۳	۶۱۷۶	۴۰۵۲۴	۲/۰۴	۶/۲۶	۳۲۹
ژنوتیپ	۴	۱۷۶/۴۶ ***	۱۴۸۰۹۶ ***	۳۰۱۰۹۲ ***	۱۳۴/۵۹ ***	۱/۷۹ ns	۲۷۵۶۵ ***
ژنوتیپ × رژیم آبیاری	۴	۱/۵۰ ns	۵۰۰۱ ns	۲۷۶۱ ns	۴/۶۵ ns	۳۳/۵۳ **	۱۸۶/۲۸ ns
خطای کرت فرعی	۱۶	۱۵/۲۵	۱۱۶۰۶	۹۵۳۳	۱/۸۰	۵/۷۵	۲۵۷
ضریب تغییرات (٪)		۸/۸۶	۱۵/۶۴	۱۵/۱۶	۳/۸۲	۶/۲۱	۶/۸۷

ns، *، **، *** به‌ترتیب: عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال آماری ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

مقایسه میانگین صفات مورفولوژیک پنج ژنوتیپ گلرنگ تحت شرایط تنش کم‌آبی

مقایسه میانگین صفت ارتفاع بوته

تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی موجب کاهش معنی‌دار ارتفاع بوته گردید. برهمکنش معنی‌دار رژیم آبیاری × ژنوتیپ نشان داد که ژنوتیپ‌ها از نظر حساسیت به کم‌آبی تفاوت قابل‌توجهی دارند. ژنوتیپ صفه کمترین کاهش ارتفاع را نشان داد و در هر دو شرایط آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت، درحالی‌که ژنوتیپ امیر بیشترین کاهش معنی‌دار را داشت. ژنوتیپ‌های پرنیان، زیس‌چینی و گلدشت کاهش متوسطی داشتند (جدول ۴). از دیدگاه فیزیولوژیک، کاهش ارتفاع بوته تحت تنش کم‌آبی عمدتاً ناشی از مهار سنتز جیبرلین‌ها (GA1 و GA3)، افزایش اسید آبسیزیک در ریشه و انتقال آن به ساقه و کاهش فشار تورژسانس در سلول‌های مریستمی است که طویل‌شدن میان‌گره‌ها را محدود می‌کند (Bhattarai *et al.*, 2022; Taiz & Zeiger, 2015). برخی ژنوتیپ های متحمل با حفظ فعالیت کامبیوم آوندی و توزیع بهتر کربوهیدرات‌ها به ساقه، از کاهش شدید ارتفاع جلوگیری می‌کنند (Ghodsi *et al.*, 2004). این یافته ها با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد که کاهش ارتفاع بوته را به اختلال در تقسیم سلولی، کاهش فشار تورژسانس و محدودیت جذب مواد معدنی نسبت داده‌اند (Afzal *et al.*, 2025). همچنین، آبیاری کامل موجب حداکثر ارتفاع بوته می‌شود، درحالی‌که تنش کم‌آبی این صفت را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (La Bella *et al.*, 2019).

مقایسه میانگین صفات طول برگ، عرض برگ و سطح برگ

تنش کم‌آبی تأثیر معنی‌داری بر طول و عرض برگ داشت، در حالی که تأثیر آن بر سطح برگ از نظر آماری معنی‌دار نبود. اثر ژنوتیپ تنها بر عرض و سطح برگ معنی‌دار بود. همچنین، برهم‌کنش رژیم آبیاری × ژنوتیپ برای این صفات معنی‌دار نبود. در میان ژنوتیپ‌ها، گلدشت بیشترین کاهش را در طول برگ نشان داد، در حالی که ژنوتیپ‌های امیر و صفه پایدارترین پاسخ را به تنش داشتند. در صفت عرض برگ، ژنوتیپ صفه در هر دو شرایط بالاترین مقدار را حفظ کرد. در سطح برگ نیز ژنوتیپ‌های پرنیان و صفه بالاترین مقادیر را در هر دو رژیم آبیاری نشان دادند و ژنوتیپ امیر کمترین کاهش را تجربه کرد؛ درمقابل، گلدشت بیشترین افت را داشت (جدول ۵). کاهش ابعاد برگ تحت تنش کم‌آبی یک پاسخ سازگاری کلاسیک برای کاهش سطح تعرق و بهبود کارایی مصرف آب است. این پدیده از طریق کاهش تقسیم و طویل‌شدن سلول‌های اپیدرمی و مزوفیل، تسریع پیری برگ‌های پایینی و تغییر نسبت اکسین/سیتوکینین در مریستم‌های برگی رخ می‌دهد (Yavas *et al.*, 2024). در گلرنگ، کاهش شاخص سطح برگ با افزایش ضخامت کوتیکول، کاهش چگالی روزنه‌ای و تغییر آرایش برگ‌ها به سمت حالت عمودی همراه است که جذب تابش را بهینه و اتلاف آب را کاهش می‌دهد (Mosupiemang *et al.*, 2022). این نتایج با گزارش‌های دیگر همسو است که کم‌آبی را عامل کاهش معنی‌دار اندازه برگ در گلرنگ بهاره می‌دانند (Esmaeilzadeh *et al.*, 2022).

مقایسه میانگین صفت تعداد شاخه‌های جانبی

تنش کم‌آبی موجب کاهش شدید تعداد شاخه‌های جانبی در این مطالعه گردید. برهمکنش معنی‌دار رژیم آبیاری × ژنوتیپ نشان‌دهنده واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها بود. ژنوتیپ صفه در شرایط آبیاری کامل بیشترین تعداد شاخه جانبی را تولید کرد، اما تحت تنش کم‌آبی کاهش معنی‌دار و شدیدی نشان داد. درمقابل، ژنوتیپ‌های امیر و زیس‌چینی کاهش کمتری داشتند و پایداری بیشتری از خود نشان دادند. ژنوتیپ‌های گلدشت و پرنیان اگرچه تعداد شاخه کمتری تولید کردند، اما ثبات نسبی در شرایط تنش داشتند (جدول ۵). شاخه‌دهی جانبی تحت کنترل قوی غالبیت انتهایی و مسیرهای هورمونی اکسین-استریگولاکتون قرار دارد. تنش کم‌آبی با کاهش انتقال اکسین از جوانه انتهایی و برهم‌زدن تعادل هورمونی، خروج جوانه‌های جانبی را مهار می‌کند (Dong *et al*., 2025). بااین‌حال، ژنوتیپ‌های متحمل با حفظ تعادل اسمزی، تجمع پرولین و قندهای محلول و توزیع کارآمدتر کربوهیدرات‌ها به مریستم‌های جانبی، قادر به حفظ بخشی از پتانسیل شاخه‌دهی هستند (Canavar *et al*., 2014). این یافته‌ها با گزارش‌های پیشین سازگار است که تفاوت در تعداد شاخه جانبی را ناشی از ساختار ژنتیکی و تعامل آن با شرایط محیطی گزارش کرده‌اند و تأکید نموده‌اند که این صفت تحت تنش کاهش می‌یابد، اما ژنوتیپ‌های مقاوم‌تر آن را بهتر حفظ می‌کنند (Ghamarnia et *al*., 2010; Nazari *et al*., 2022).

مقایسه میانگین صفات قطر ساقه و قطر غوزه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیم آبیاری بر قطر ساقه و قطر غوزه معنی‌دار بود. اثر ژنوتیپ بر هر دو صفت معنی‌دار بود که وجود تنوع ژنتیکی قابل‌توجه را تأیید می‌کند. اثر متقابل ژنوتیپ × رژیم آبیاری تنها برای صفت قطر غوزه معنی‌دار شد که نشان‌دهنده واکنش متفاوت ژنوتیپ‌ها به کم‌آبی در این صفت است. بررسی مقایسه میانگین‌ها (جدول ۵) نشان داد که در شرایط آبیاری کامل، ژنوتیپ‌ها از نظر قطر ساقه اختلاف معنی‌داری نداشتند. تحت تنش کم‌آبی، ژنوتیپ صفه بیشترین قطر ساقه را حفظ کرد و کمترین کاهش را نسبت به شرایط عادی داشت، بنابراین به‌عنوان مقاوم‌ترین ژنوتیپ در این صفت شناخته می‌شود. ژنوتیپ گلدشت کمترین قطر ساقه را داشت و حساس‌ترین بود. ژنوتیپ‌های امیر و زیس‌چینی کاهش معنی‌داری نشان دادند، درحالی‌که پرنیان بین دو شرایط تفاوت معنی‌داری نداشت و پایداری نسبی داشت. در صفت قطر غوزه، ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری کامل اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما تحت تنش کم‌آبی واکنش‌ها متفاوت بود؛ زیس‌چینی بیشترین کاهش را نشان داد و حساس‌ترین ژنوتیپ بود، درحالی‌که امیر، پرنیان و گلدشت کاهش معنی‌داری نشان ندادند و پایدارترین محسوب شدند. ژنوتیپ صفه نیز کاهش متوسطی داشت.

حفظ قطر ساقه تحت تنش کم‌آبی نشان‌دهنده فعالیت نسبی لایه زاینده (کامبیوم) و تداوم تشکیل آوندهای چوبی جدید است که برای انتقال آب و مواد معدنی به اندام‌های زایشی حیاتی است. ژنوتیپ‌های متحمل معمولاً با افزایش رسوب لیگنین، تقویت دیواره سلولی و تنظیم اندازه آوندها، از کُلاپس هیدرولیکی جلوگیری می‌کنند (Choi *et al*., 2024). ژنوتیپ‌هایی که کاهش قطر غوزه کمتری نشان می‌دهند، معمولاً دارای کارایی بالاتر در حفظ فشار تورژسانس بافت‌های زایشی و تنظیم بهتر بیان ژن‌های مرتبط با پرشدن دانه هستند (Licata *et al*., 2023). تنش کم‌آبی پس از گلدهی با برهم‌زدن تعادل هورمونی (کاهش جیبرلین و سیتوکینین، افزایش اسید آبسیزیک و اتیلن)، محدودیت جذب یون‌ها و کاهش انتقال کربوهیدرات‌ها به اندام‌های هوایی، رشد رویشی و زایشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Taiz & Zeiger, 2015). در گلرنگ، تنوع ژنتیکی در پاسخ به کم‌آبی اغلب از طریق مکانیسم‌های اجتناب (مانند کاهش سطح برگ و تنظیم روزنه‌ای)، تحمل (تنظیم اسمزی و حفظ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان) و فرار (تسریع چرخه رشد) کنترل می‌شود (Hussain *et al*., 2015).

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات مورفولوژیکی ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

ژنوتیپ	تیمار	ارتفاع بوته (cm)	طول برگ (cm)	عرض برگ (cm)	سطح برگ (cm)	تعداد شاخه‌های جانبی	قطر ساقه (cm)	قطر غوزه (cm)
امیر	آبیاری کامل	۶۸/۵±۱/۱ b	۵/۳±۰/۵ bc	۲/۲±۰/۱ ab	۸/۶±۱/۱ a-c	۱۰/۴±۰/۹ b	۰/۶۹±۰/۰۶ ab	۳/۵±۰/۱۳ a
	تنش کم‌آبی	۵۸/۷ ±۱/۷d	۵/۲±۰/۸ bc	۲/۲±۰/۲ b	۸/۵±۰/۸ a-c	۹/۹±۰/۴bc	۰/۶۲±۰/۰۷ bc	۳/۵±۰/۱ a
گلدشت	آبیاری کامل	۶۷/۷±۲/۱bc	۵/۹±۰/۷ ab	۲/۲±۰/۱ ab	۹/۱±۱/۳ ab	۷/۶±۰/۳ de	۰/۶۴±۰/۰۵ a-c	۳/۶±۰/۲۴ a
	تنش کم‌آبی	۶۴/۲±۱/۶ c	۴/۸۳±۰/۲ c	۱/۸±۰/۱ c	۶/۹±۰/۸ c	۶/۸±۰/۴ e	۰/۵۸±۰/۰۵۰ c	۳/۲±۰/۲۷ ab
پرنیان	آبیاری کامل	۶۹/۳±۱/۲ b	۶/۲±۰/ ۶a	۲/۱±۰/۲b	۹/۹±۱/۴ a	۷/۸±۱ de	۰/۶۶±۰/۰۲ a-c	۳/۶±۰/۳۹ a
	تنش کم‌آبی	۶۵/۱±۳/۳ bc	۵/۳±۰/۷ bc	۲/۰±۰/۱ bc	۹/۶±۰/۷ a	۶/۹±۰/۳e	۰/۶۴±۰/۰۴ a-c	۳/۳±۰/۲۴ ab
صفه	آبیاری کامل	۸۷/۴±۲/۱a	۵/۴±۰/۲ a-c	۲/۴±۰/۲ a	۹/۸±۱/۴ a	۱۳/۶±۱/۱a	۰/۷۱±۰/۰۴۳a	۳/۴±۰/۰۹ ab
	تنش کم‌آبی	۸۶/۳±۳/۴a	۵/۳±۰/۸ a-c	۲/۲±۰/۳ab	۹/۴±۰/۳ ab	۸/۲±۱/۵ de	۰/۷۰±۰/۰۲ a	۲/۹±۰/۲۶ b
زیس چینی	آبیاری کامل	۶۹/۳±۰/۹ b	۵/۶±۰/۱ a-c	۲/۲±۰/۱۸ ab	۸/۳±۱/۳ a-c	۸/۸±۰/۵cd	۰/۶۶±۰.۴۱ a-c	۳/۶±۰/۳۴ a
	تنش کم‌آبی	۶۶/۹±۳/۱ bc	۵/۳±۰/۳ bc	۲/۱±۰/۱ bc	۷/۶±۱/۳ bc	۸/۴±۱/۱ c-e	۰/۶۱±۰/۰۳ bc	۲/۳±۰/۳۳ c

مقادیر میانگین با حروف لاتین یکسان بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار نشان ندادند.

مقایسه میانگین صفات درصد روغن، عملکرد و صفات وابسته به آن در پنج ژنوتیپ گلرنگ تحت شرایط تنش کم‌آبی

مقایسه میانگین صفت وزن ۲۰ غوزه

وزن ۲۰ غوزه کمترین حساسیت را به تنش کم‌آبی نشان داد و تفاوت معنی‌داری بین دو رژیم آبیاری برای اکثر ژنوتیپ‌ها مشاهده نشد. نتایج مقایسه میانگین نشان داد (جدول ۶) که ژنوتیپ‌های گلدشت و زیس‌چینی بیشترین مقدار را داشتند (به‌ترتیب حدود ۸/۴ تا ۹/۴ گرم) و تغییرات بین شرایط آبیاری ناچیز بود (به‌ترتیب ۸/۱ تا ۷/۷ درصد). پایداری این صفت نشان می‌دهد که ابعاد ساختاری غوزه بیشتر تحت کنترل ژنتیکی و مراحل اولیه تمایز گُل‌آذین قرار دارد و تغییر پذیری فنوتیپی کمتری نسبت به صفات عملکردی کمی دارد. این یافته با نتایج Licata و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد که صفات مرتبط با اندازه اندام‌های زایشی را دارای وراثت پذیری بالا، پلاستیسیته محیطی پایین و ثبات بیشتر در برابر تنش‌های کوتاه‌مدت توصیف کرده‌اند. مطالعات ژنتیکی نشان داده‌اند که اندازه غوزه (قطر و وزن) بیشتر تحت تأثیر عوامل ژنتیکی است تا شرایط محیطی (Hassani *et al*., 2024; Pearl *et al*., 2014). مطالعه‌ای نشان داد که قطر غوزه و تعداد دانه در غوزه ازجمله صفاتی هستند که تحت تنش کم‌آبی کاهش می‌یابند، اما شدت کاهش آن‌ها نسبت به سایر صفات کمتر است (Hassani *et al*., 2024). اگرچه وزن ۲۰ غوزه به‌تنهایی شاخص مناسبی برای تحمل به کم‌آبی محسوب نمی‌شود، اما می‌تواند به‌عنوان یک صفت مکمل در کنار سایر شاخص‌های فیزیولوژیک و عملکردی در برنامه‌های اصلاحی مورداستفاده قرار گیرد. پایداری این صفت نشان می‌دهد که ژنوتیپ‌هایی با وزن ۲۰ غوزه بالاتر، پتانسیل عملکردی ذاتی بیشتری دارند.

مقایسه میانگین صفت وزن کل غوزه

وزن کل غوزه به‌عنوان شاخصی از قدرت چاهک (Sink strength) و ظرفیت ذخیره‌سازی نهایی، تحت تنش کاهش یافت. ژنوتیپ صفه با ۱۰۵۷ گرم بر مترمربع در شرایط آبیاری کامل و ۸۳۰ گرم بر مترمربع تحت تنش کم‌آبی، برتری خود را حفظ کرد (جدول ۶). اگرچه کاهش مطلق در این صفت قابل‌توجه بود (در حدود ۲۱/۴ درصد)، اما حفظ وزن غوزه در سطح بالا نشان‌دهنده توانایی ژنوتیپ در هدایت مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی و جلوگیری از سقط یا چروکیدگی غوزه‌هاست. ژنوتیپ زیس‌چینی بیشترین کاهش در حدود ۳۰/۲ درصد را نشان داد. مطالعات همبستگی نشان داده‌اند که وزن غوزه در شرایط تنش همبستگی بالاتری با عملکرد دانه نسبت به شرایط آبیاری در گلرنگ دارد. در شرایط تنش، به‌دلیل شرایط نامطلوب، گیاه منابع خود را به‌طور انتخابی‌تری تخصیص می‌دهد و وزن غوزه به یک شاخص مهم‌تر تبدیل می شود (Mozaffari & Asadi, 2006; Nezhad *et al*., 2015). مطالعه‌ای توسط Shekari و همکاران (۲۰۲۵) نشان داد که وزن غوزه در شرایط آبیاری کامل دارای وراثت‌پذیری بالایی است و همراه با تعداد روزها تا ۵۰ درصد گلدهی و تعداد روزها تا رسیدگی، ازجمله صفاتی است که می‌تواند

در برنامه‌های اصلاحی مورداستفاده قرار گیرد. پایداری نسبی وزن کل غوزه در ژنوتیپ‌های صفه و گلدشت نشان می‌دهد که این ژنوتیپ‌ها دارای سیستم آوندی کارآمدتر و هماهنگی بهتری بین منبع و چاهک تحت شرایط کم‌آبی هستند. این ویژگی همراه با عملکرد بالای دانه، نشان می‌دهد که این ژنوتیپ‌ها قادرند مواد فتوسنتزی تولیدی را به‌طور مؤثر به اندام‌های زایشی هدایت کنند.

مقایسه میانگین صفت وزن زیست‌توده

وزن زیست‌توده نشان‌دهنده پتانسیل رشد رویشی و تجمع ماده خشک در طول دوره رشد است. ژنوتیپ صفه با تولید ۱۰۹۵ گرم بر مترمربع زیست‌توده در شرایط آبیاری کامل و با ۹۶۶ گرم بر مترمربع تحت تنش، برتری مطلق خود را حفظ کرد. کاهش نسبی کمتر این ژنوتیپ (۱۱/۷ در صد) نشان‌دهنده کارایی بالاتر در جذب نور، حفظ سطح برگ فعال و تعادل بهینه بین رشد رویشی و زایشی است. درمقابل، ژنوتیپ زیس‌چینی با کاهش ۲۷/۳ درصد، حساسیت بیشتری به محدودیت آبی نشان داد (جدول ۶). مطالعه‌ای جامع توسط Maghsoudi و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که قطع آبیاری در مرحله رویشی (طویل شدن ساقه)، بیشترین اثر منفی را بر عملکرد بیولوژیک دارد، درحالی‌که قطع آبیاری در مراحل بعدی اثر کمتری دارد. مطالعات فیزیولوژیک نشان می‌دهند که ژنوتیپ‌های متحمل با تنظیم اسمزی مؤثر ازجمله تجمع پرولین و قندهای محلول، حفظ فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تعادل هورمونی بهینه، فتوسنتز را تداوم می‌بخشند و از کاهش شدید زیست‌توده جلوگیری می‌کنند (Manikanta *et al.*, 2023). برتری ژنوتیپ صفه در وزن زیست‌توده نشان می‌دهد که این ژنوتیپ قادر است حتی تحت تنش، شبکه فتوسنتزی خود را تا حد زیادی فعال نگه دارد، از آسیب غشای سلولی جلوگیری کند و با تنظیم اسمزی مؤثر، رشد رویشی را تداوم بخشد. این ویژگی همراه با عملکرد بالای دانه، نشان‌دهنده تعادل بهینه بین رشد رویشی و زایشی در این ژنوتیپ است.

مقایسه میانگین صفت وزن هزار دانه

وزن هزار دانه تحت تأثیر تنش کم‌آبی قرار گرفت، اما الگوی پایداری ژنوتیپ‌ها متمایز بود. ژنوتیپ گلدشت بیشترین وزن هزار دانه را در هر دو شرایط حفظ کرد (۴۲/۲ به ۳۹/۸ گرم به‌ترتیب در شرایط آبی و تنش با کاهش ۵/۷ درصدی)، درحالی‌که صفه باوجود وزن هزار دانه کمتر در شرایط آبی (۲۸/۴ گرم)، پایدارترین واکنش را نشان داد (کاهش ۳/۸ درصدی). ژنوتیپ پرنیان با ۱۲/۶ درصد کاهش بیشترین افت را نشان داد (جدول ۶). این تفاوت بیانگر استراتژی‌های متفاوت سازگاری اکولوژیک است. گلدشت بر حفظ اندازه فردی دانه‌ها تکیه دارد، درحالی‌که صفه با تولید تعداد دانه بیشتر در هر غوزه، جبران اندازه کوچک‌تر را انجام می‌دهد. تحلیل ضرایب مسیر در مطالعات مختلف نشان داده‌اند که وزن هزار دانه تحت هر دو شرایط آبی و تنش کم‌آبی، همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه دارد و به‌عنوان یکی از تعیین‌کننده‌های کلیدی عملکرد نهایی شناخته می‌شود، همچنین در شرایط تنش کم‌آبی، ثبات وزن هزار دانه بیش از مقدار مطلق آن، با عملکرد نهایی همبستگی دارد، زیرا نشان‌دهنده تداوم دوره پُر شدن دانه و کارایی انتقال آسیمولات‌هاست (Koç, 2021). مطالعه‌ای توسط Rahimi (۲۰۲۱) نشان داد که تنش کم‌آبی وزن هزار دانه را در تمام ارقام گلرنگ کاهش می‌دهد، اما شدت این کاهش بین ارقام متفاوت است. به‌عنوان مثال، رقم پدیده بیشترین (۴۳ گرم) و کمترین (۲۳ گرم) وزن هزار دانه را تحت تنش نشان داد که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل‌توجه در پاسخ به تنش است.

مقایسه میانگین صفت درصد کل روغن

در صد روغن پیچیده‌ترین الگوی پاسخ را در میان صفات موردمطالعه نشان داد. ژنوتیپ پرنیان علی‌رغم داشتن بالاترین در صد کل روغن در شرایط آبیاری کامل از ۴۴/۶ درصد به ۳۲/۷ درصد تحت تنش کم‌آبی نزول کرد (کاهش ۲۶ درصدی) و این دو مقدار در دو گروه متمایز آماری قرار گرفتند (جدول ۶). این افت شدید نشان می‌دهد که پتانسیل بالای روغن سازی در این ژنوتیپ به شدت وابسته به شرایط آبی مطلوب است و تحت محدودیت کربنی، مسیرهای بیوسنتز لیپید به‌سرعت مختل می‌شوند. درمقابل، ژنوتیپ‌های صفه، گلدشت و زیس‌چینی پایداری قابل‌توجهی نشان دادند (به‌ترتیب کاهش ۸/۲، ۲/۵ و ۷/۵ درصدی) و در یک گروه آماری قرار گرفتند. در مطالعه که توسط Ali و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد درصد روغن دانه برخلاف عملکرد دانه، روند معکوسی نشان داد و تحت شرایط دیم (تنش) افزایش یافت (میانگین ۴۹/۲۹ درصد

در مقایسه با ۶۰/۲۷ درصد در شرایط آبی). این افزایش نشان می‌دهد که برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است تجمع روغن را به‌عنوان یک پاسخ به تنش افزایش دهند که این صفت می‌تواند برای اصلاح ارقام متحمل به کم‌آبی ارزشمند باشد. درمقابل، مطالعات متعدد دیگری کاهش درصد روغن را تحت تنش کم‌آبی گزارش کرده‌اند. Zafari و همکاران (۲۰۲) نشان دادند که تنش کم‌آبی با کاهش فعالیت آنزیم های کلیدی مانند استیل-کوآکربوکسیلاز و دسچورازهای اسید چرب، سنتز اسیدهای چرب اشباع‌نشده و تجمع تری‌آسیل‌گلیسرول را محدود می‌کند. مطالعه‌ای توسط Joshan و همکاران (۲۰۱۹) روی ژنوتیپ های گلرنگ نشان داد که تنش کم‌آبی آخر فصل در شرایط کشت تأخیری، درصد روغن و ترکیب اسیدهای چرب را به‌طور معنی‌داری تغییر می‌دهد. پایداری درصد روغن در ژنوتیپ‌های صفه و گلدشت در این پژوهش حاکی از تنظیم بهینه بیان ژن های دخیل در متابولیسم روغن، حفظ تعادل هورمونی (به‌ویژه سیتوکینین‌ها) و جلوگیری از اکسیداسیون لیپیدهای ذخیره‌ای تحت تنش است. افت شدید درصد روغن در ژنوتیپ پرنیان (۷/۲۶ درصدی) نشان می‌دهد که این ژنوتیپ احتمالاً دارای سطوح پایین‌تری از آنزیم‌های کلیدی بیوسنتز روغن تحت تنش است و نمی‌تواند مسیرهای متابولیکی تولید روغن را حتی تحت محدودیت کربنی حفظ کند. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌ها صرفاً بر اساس درصد روغن در شرایط مطلوب می‌تواند گمراه‌کننده باشد و پایداری کیفی تحت تنش باید معیار گزینش قرار گیرد.

مقایسه میانگین صفت عملکرد دانه

تنش کم‌آبی پس از گلدهی موجب کاهش معنی‌دار عملکرد کل دانه گردید، اما شدت این کاهش به‌شدت وابسته به ژنوتیپ بود. ژنوتیپ صفه با عملکرد ۳۴۱ گرم بر مترمربع در شرایط آبیاری کامل و ۳۱۵ گرم بر مترمربع تحت تنش، برترین ژنوتیپ از نظر عملکرد مطلق و پایداری بود و تنها ۷/۶ درصد کاهش نشان داد. جالب‌توجه اینکه این ژنوتیپ در هر دو شرایط در یک گروه آماری قرار گرفت که نشان‌دهنده عدم افت معنی‌دار عملکرد تحت تنش است. درمقابل، ژنوتیپ‌های پرنیان و امیر به‌ترتیب ۱۱/۵ و ۱۳/۸ درصد کاهش عملکرد را تجربه کردند (جدول ۶). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های متعدد اخیر همسو است. (Manikanta *et al*., 2023) گزارش کردند که تنش رطوبت باقیمانده در گلرنگ منجر به کاهش ۲۲ تا ۴۲ درصدی عملکرد دانه می‌شود و ژنوتیپ‌های ISF-764 و A-1 با عملکرد به‌ترتیب ۶۹/۲۱ و ۶۴/۱۸ گرم در بوته، برترین عملکرد را تحت تنش نشان دادند. در مطالعه‌ای جامع‌تر، Ali و همکاران (۲۰۲۴) با ارزیابی ۹۰ ژنوتیپ گلرنگ تحت شرایط دیم و آبی دریافتند که تنش کم‌آبی موجب کاهش حدود ۴۰ درصدی عملکرد دانه می‌شود (از ۱۱۱۵ کیلوگرم در هکتار به ۶۷۳ کیلوگرم در هکتار) و این کاهش به‌طور معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها متفاوت است .Shahrokhnia و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کردند که تنش کم‌آبی در گلرنگ عمدتاً از طریق کاهش فتوسنتز، تمام اجزای عملکرد را کاهش می‌دهد و منجر به افت عملکرد دانه می‌شود. در مطالعه‌ای اخیر، Karami و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که قطع آبیاری در مرحله گلدهی و گرده‌افشانی، بیشترین اثر منفی را بر عملکرد دانه دارد و این امر به کاهش تشکیل غوزه‌ها و پُر شدن دانه‌ها نسبت داده می‌شود. پایداری عملکرد در ژنوتیپ صفه در این پژوهش احتمالاً ناشی از ترکیبی از مکانیسم‌های توزیع کارآمد کربوهیدرات‌ها به سمت چاهک‌های زایشی، حفظ فعالیت فتوسنتزی و جلوگیری از سقط غنچه‌ها تحت تنش می‌باشد.

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات درصد روغن، عملکرد و صفات وابسته به آن تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

ژنوتیپ	رژیم آبیاری	وزن ۲۰ غوزه (g)	وزن کل غوزه (g)	وزن زیست‌توده ($g.m^{-2}$)	وزن هزار دانه ($g.m^{-2}$)	روغن (٪)	عملکرد کل دانه ($g.m^{-2}$)
امیر	آبیاری کامل	۴۷/۷±۴/۵۰ a	۷۱۹±۶۷/۱ bc	۶۴۱±۱۳/۶ b	۳۹/۵±۱/۴ bc	۳۸/۶±۱/۸ b	۲۴۶±۷/۱ c
	تنش کم‌آبی	۴۶/۷±۲/۱ a	۶۱۲±۱۱۱/۱ cd	۵۳۷±۸۳/۹ bc	۳۵/۱±۰/۷ d	۳۶/۸±۱/۹ bc	۲۰۷±۱۸/۰ d
گلدشت	آبیاری کامل	۴۹/۳±۴/۲ a	۷۵۷±۴۶/۵ bc	۶۸۱±۸۹/۳ b	۴۲/۲±۲/۵ a	۳۹/۲±۳/۸ b	۲۴۸±۱۸/۹ b
	تنش کم‌آبی	۴۸/۳±۶/۴ a	۶۳۸±۱۲۳/۱ bcd	۵۵۷±۷۵/۰ bc	۳۹/۸±۰/۹ b	۳۸/۰±۱/۳ b	۲۴۸±۲/۰ c
پرنیان	آبیاری کامل	۳۸/۰±۲ b	۵۸۶±۱۱۹/۹ cd	۵۱۰±۳۴/۹ bc	۳۷/۳±۰/۹ cd	۴۴/۶±۱/۸ a	۱۶۴±۹/۵ ef
	تنش کم‌آبی	۳۷/۶±۲/۱ b	۴۵۹±۱۲۹/۴ d	۴۶۹±۹۳/۰ bc	۳۲/۶±۱/۱ e	۳۲/۷±۱/۷ c	۱۴۵±۶/۴ f
صفه	آبیاری کامل	۴۰/۰±۲/۰ b	۱۰۵۷±۱۵۸/۶ a	۱۰۹۵±۲۴۲/۹ a	۲۸/۶±۱/۴ f	۳۹/۴±۴/۱ b	۳۴۱±۳۵/۹ a
	تنش کم‌آبی	۳۷/۰±۳/۵ b	۸۳۰±۱۷/۶ b	۹۶۶±۱۳۸/۵ a	۲۷/۵±۱/۳ f	۳۸/۶±۱/۰ b	۳۱۵±۱۶/۳ a
زیس‌چینی	آبیاری کامل	۴۸/۶±۴/۰ a	۷۲۳±۹۶/۶ bc	۵۶۷±۹۷/۹ bc	۳۷/۱±۱/۲ d	۳۹/۹±۱/۵ b	۱۹۵±۳/۸ d
	تنش کم‌آبی	۴۷/۳±۲/۵ a	۵۰۴±۱۵/۹ d	۴۱۲±۳۵/۳ c	۳۱/۸±۰/۹ e	۳۸/۲±۱/۸ b	۱۸۲±۶/۸ de

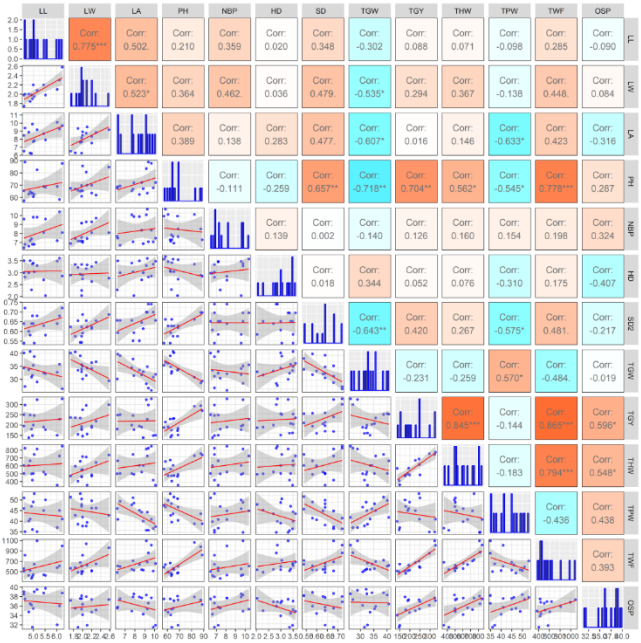
مقادیر میانگین با حروف لاتین یکسان بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار نشان ندادند.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که ژنوتیپ صفه در مجموعه‌ای از صفات مورفولوژیک و عملکردی شامل ارتفاع بوته، صفات برگ، تعداد شاخه‌های جانبی، قطر ساقه و غوزه، وزن غوزه، وزن زیست‌توده، وزن هزار دانه و عملکرد دانه، پایداری و برتری قابل‌توجهی نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها داشت و تنها کاهش محدود در چند صفت تحت تنش کم‌آبی مشاهده شد. این ژنوتیپ باوجود داشتن دانه‌های کوچک‌تر، به‌دلیل تعداد بیشتر دانه‌ها عملکرد بالاتری تولید کرد و در هر دو شرایط آبیاری به‌عنوان ژنوتیپ برتر قابل معرفی است. گلدشت نیز در اغلب صفات، به‌ویژه وزن هزار دانه و عملکرد دانه، رفتار نسبتاً پایداری داشت و نزدیک‌ترین ژنوتیپ به صفه بود. درمقابل، ژنوتیپ‌های پرنیان و زیس‌چینی بیشترین حساسیت را به کم‌آبی نشان دادند و کاهش قابل‌توجهی در صفات مختلف داشتند، هرچند پرنیان در درصد روغن پتانسیل بالاتری در شرایط آبیاری داشت. این یافته‌ها اهمیت گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم و پایدار را برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که صفه و تا حدی گلدشت می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای برنامه‌های به‌نژادی گلرنگ در شرایط کم‌آبی باشند.

ضرایب همبستگی بین صفات موردمطالعه در ارقام گلرنگ تحت شرایط آبیاری کامل پس از مرحله گلدهی

تحلیل ماتریس همبستگی پیرسون در شرایط آبیاری کامل نشان می‌دهد که در غیاب محدودیت آبی، تعاملات فیزیولوژیکی بین صفات مورفولوژیکی و عملکردی در گلرنگ الگوی هم‌افزایی را شکل داده است (شکل ۱)؛ به‌طوری‌که عملکرد کل دانه همبستگی‌های مثبت بسیار قوی و معنی‌داری با وزن کل زیست‌توده (*** ۰/۸۶۵)، وزن کل غوزه (*** ۰/۸۴۵)، ارتفاع بوته (** ۰/۷۰۴) و نکته حائز اهمیت، درصد روغن دانه (* ۰/۵۹۶) نشان داد که بیانگر عدم رقابت منابع بین کمیت و کیفیت و امکان بهبود هم‌زمان آن‌ها در شرایط بهینه است. ارتفاع بوته به‌عنوان یک صفت ساختاری محوری، با زیست‌توده (*** ۰/۷۷۸)، قطر ساقه (** ۰/۶۵۷) و وزن غوزه (* ۰/۵۶۲) رابطه مثبت معنی‌داری داشت و نقش تسهیل‌کننده‌ای در هدایت مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی ایفا می‌کند. بااین‌حال، یک مبادله فیزیولوژیکی آشکار بین رشد رویشی/ ساختاری و پُرشدگی دانه مشاهده شد، زیرا وزن هزار دانه همبستگی‌های منفی معنی‌داری با ارتفاع بوته (** ۰/۷۱۸)، قطر ساقه (** ۰/۶۴۳) و سطح برگ (*۰/۶۰۷) نشان داد که حاکی از رقابت درونی گیاه برای تخصیص کربن به توسعه ساختاری درمقابل پُر کردن دانه‌ها است. جالب‌توجه آنکه وزن هزار دانه با عملکرد نهایی (ns ۰/۲۳۱-) و درصد روغن (ns ۰/۰۱۹-) همبستگی معنی‌داری نداشت که استقلال ژنتیکی نسبی اندازه دانه از دو صفت کلیدی کمی و کیفی را تأیید می‌کند. از سوی دیگر، درصد روغن ضمن حفظ رابطه مثبت با عملکرد و وزن غوزه، وابستگی معنی‌داری به صفات رویشی یا وزن دانه نداشت و الگوی کلی همبستگی‌ها نشان می‌دهد که در شرایط آبیاری کامل، انتخاب غیرمستقیم از طریق ارتفاع بوته، زیست‌توده و وزن غوزه می‌تواند به‌طور هم‌زمان عملکرد و کیفیت روغن را ارتقا دهد، هرچند مدیریت رابطه معکوس ارتفاع و

وزن هزار دانه مستلزم به‌کارگیری شاخص‌های انتخاب چندصفتی یا وزن‌دهی متعادل در برنامه‌های اصلاحی مناطق برخوردار خواهد بود. همچنین یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که وزن هزار دانه به‌تنهایی تعیین‌کننده عملکرد نهایی نیست و تحت تأثیر مجموعه‌ای از صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد قرار دارد. مطالعات اخیر نیز این موضوع را تأیید کرده‌اند؛ به‌طوری‌که در یک پژوهش جامع بر روی لاین‌ها و ژنوتیپ‌های گلرنگ، صفاتی مانند نسبت طول به عرض دانه، ارتفاع بوته و میزان پوسته به‌عنوان شاخص‌های ساده و قابل‌اعتماد برای پیش‌بینی درصد روغن و بهبود کیفیت آن معرفی شدند و تعداد دانه در غوزه نیز به‌عنوان مهم‌ترین جزء عملکرد برای افزایش عملکرد بدون کاهش در صد روغن گزارش شد (Cerrotta *et al.*, 2020). همچنین ارزیابی ۱۲۷ ژنوتیپ گلرنگ در شرایط نیمه‌خشک نشان داد که صفاتی مانند قطر ساقه، تعداد شاخه‌ها، تعداد غوزه و تعداد دانه در غوزه بیشترین همبستگی را با مؤلفه‌های اصلی عملکرد داشته و می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در شرایط کم‌آبی مورداستفاده قرار گیرند (Ojaq *et al.*, 2020). این شواهد نشان می‌دهد که عملکرد دانه نتیجه تعامل چندین صفت مهم است و استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های مورفولوژیک و اجزای عملکرد می‌تواند دقت انتخاب در برنامه‌های اصلاحی گلرنگ را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.



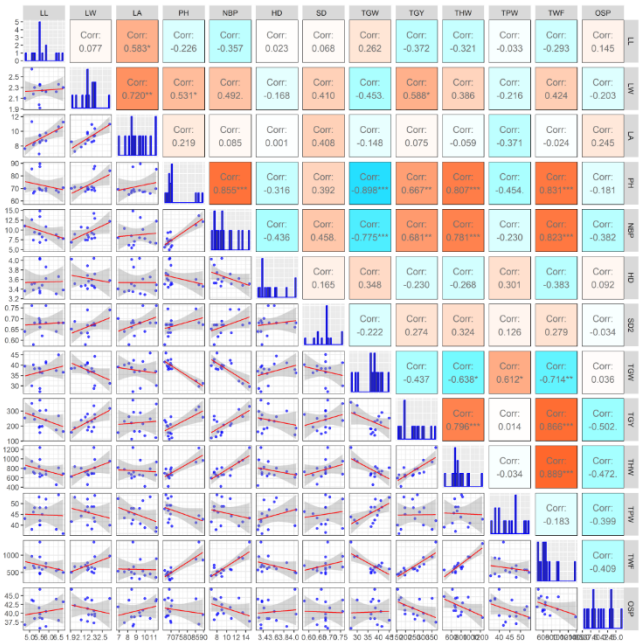
شکل ۱- ماتریس همبستگی پیرسون بین صفات مورفولوژیکی و عملکردی در ژنوتیپ‌های گلرنگ در شرایط آبیاری کامل

*، ** و *** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱. (رنگ‌های گرم نشان‌دهنده همبستگی مثبت و رنگ‌های سرد نشان‌دهنده همبستگی منفی است). LL: طول برگ، LW: عرض برگ، LA: سطح برگ SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، NBP: تعداد شاخه جانبی، HD: قطر غوزه، TGW: وزن هزار دانه، TGY: عملکرد کل دانه، THW: وزن کل غوزه، TPW: وزن ۲۰ غوزه، TWF: وزن کل زیست‌توده، OSP: درصد کل روغن

ضرایب همبستگی بین صفات موردمطالعه در ارقام گلرنگ تحت تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

تحلیل ماتریس همبستگی پیرسون تحت شرایط تنش کم‌آبی نشان داد که الگوی تعامل صفات نسبت به شرایط آبیاری کامل دستخوش تغییرات ساختاری شده است (شکل ۲). عملکرد کل دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری با ارتفاع بوته (** ۰/۶۶۷)، وزن زیست‌توده (*** ۰/۸۶۶) و وزن غوزه (** ۰/۷۹۶) نشان داد که بیانگر وابستگی عملکرد به حفظ رشد رویشی و زایشی تحت تنش است. بااین‌حال، برخلاف شرایط آبیاری کامل، همبستگی عملکرد کل دانه با درصد روغن به سمت منفی متمایل شد (** ۰/۵۰۲-) که نشان‌دهنده رقابت منابع کربنی و مبادله بین کمیت و کیفیت دانه در شرایط کم‌آبی است. وزن هزار دانه همبستگی منفی بسیار قوی و معنی‌داری با ارتفاع بوته (*** ۰/۸۹۸) و زیست‌توده (** ۰/۷۱۴) داشت که حاکی از تشدید مبادله فیزیولوژیکی بین اندازه دانه و رشد گیاه تحت تنش کم‌آبی است. ارتفاع بوته به‌عنوان صفت محوری، با عملکرد و زیست‌توده رابطه مثبت قوی، اما با وزن دانه رابطه معکوس

شدیدی نشان داد. تعداد شاخه‌های جانبی نیز با عملکرد دانه، وزن هزار دانه، وزن کل غوزه و وزن زیست‌توده رابطه مثبت و معنی‌داری داشت که بیانگر نقش این صفت در افزایش ظرفیت زایشی گیاه است. وزن کل غوزه نیز با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت و وزن ۲۰ غوزه با وزن زیست‌توده و وزن کل غوزه رابطه مثبت نشان داد. در مجموع، تنش کم‌آبی ساختار همبستگی‌ها را به سمت افزایش رقابت درونی گیاه برای تخصیص فتوسنتات‌ها سوق داده و انتخاب هم‌زمان برای عملکرد بالا، دانه درشت و درصد روغن مطلوب را با چالش مواجه می‌سازد؛ بنابراین، استفاده از شاخص‌های انتخاب چندصفتی یا نشانگرهای مولکولی برای شکستن این پیوندهای منفی در برنامه‌های اصلاحی تحمل به کم‌آبی ضروری به نظر می‌رسد. پژوهشگران دیگر نیز تأکید کرده‌اند که تجزیه همبستگی ابزاری مؤثر برای ارزیابی ارتباط بین صفات کلیدی گلرنگ است (Pavithra *et al.*, 2016). علاوه بر این، در نتایج تحقیقی گزارش شده است که بین قطر غوزه و ارتفاع بوته همبستگی منفی وجود دارد و افزایش قطر غوزه می‌تواند تا حدی عملکرد را بهبود دهد (Kizil et al., 2008). یافته‌های اخیر نیز نشان می‌دهد که ارتفاع بوته با عملکرد دانه (r = ۰/۶۶۷**) و وزن زیست‌توده (r = ۰/۸۳۱***) همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد و بین عملکرد دانه و زیست‌توده نیز (r = ۰/۸۶۶ ***) همبستگی بسیار بالا و معنی‌داری مشاهده شده است (Jabbari *et al.*, 2024).



شکل ۲- ماتریس همبستگی پیرسون بین صفات مورفولوژیکی و عملکردی در ژنوتیپ‌های گلرنگ در شرایط تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی. *، ** و *** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱. (رنگ‌های گرم نشان‌دهنده همبستگی مثبت و رنگ‌های سرد نشان‌دهنده همبستگی منفی است). LL: طول برگ، LW: عرض برگ، LA: سطح برگ SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، NBP: تعداد شاخه جانبی، HD: قطر غوزه، TGW: وزن هزار دانه، TGY: عملکرد کل دانه، THW: وزن کل غوزه، TPW: وزن ۲۰ غوزه، TWF: وزن کل زیست‌توده، OSP: درصد کل روغن.

تجزیه به عامل‌ها برای صفات موردمطالعه در ژنوتیپ‌های گلرنگ تحت شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی پس از مرحله گلدهی

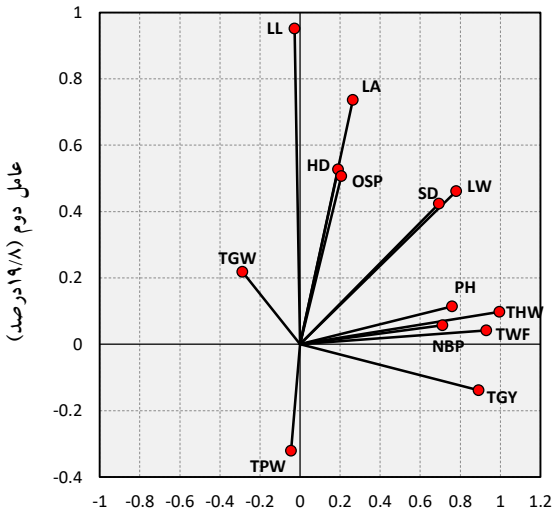
تجزیه به عامل‌ها بر اساس صفات مورفولوژیک، درصد روغن و عملکردی برای ژنوتیپ های گلرنگ براساس داده‌های تلفیقی شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی انجام شد و سه عامل با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک شناسایی گردید. این سه عامل اصلی در مجموع ۷۷/۷ درصد از تغییرات داده‌ها را پوشش می‌دهند (جدول ۷ و شکل‌های ۳ و ۴). عامل اول با سهم ۳۸/۹ درصد که مهم‌ترین جزء تغییرات است، با بارهای عاملی مثبت و بالا برای صفاتی نظیر وزن کل غوزه، عملکرد کل دانه، وزن کل زیست‌توده، عرض برگ، قطر ساقه، ارتفاع بوته و تعداد شاخه‌های جانبی همبستگی داشت؛ بنابراین، این عامل را می‌توان عامل عملکرد و پتانسیل تولید کلی نامید. هرچه مقدار یک ژنوتیپ در این عامل بیشتر باشد (سمت راست محور

افقی)، عملکرد و رشد آن بیشتر است. عامل دوم با ۱۹/۸ درصد واریانس، با صفات طول برگ، سطح برگ و قطر غوزه و درصد روغن کل همبستگی مثبت دارد و نماینده صفات رویشی و مورفولوژیکی گیاه است. عامل سوم با ۱۸/۹ درصد عمدتاً با وزن هزار دانه و وزن ۲۰ غوزه همبستگی دارد و نماینده اندازه دانه و غوزه است. بررسی نمودارهای پراکنش نشان داد که صفات عملکردی همبستگی مثبت قوی با یکدیگر دارند اما با وزن دانه تا حدی مستقل هستند. در ارزیابی ژنوتیپ‌ها، ژنوتیپ صفه در شرایط آبیاری کامل (Soffeh-N) به عنوان پرعملکردترین (بالاترین نمره عامل اول) و در شرایط تنش کم‌آبی (Soffeh-D) با حفظ موقعیت نسبتاً بهتر نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها، نشان‌دهنده تحمل به کم‌آبی و پایداری عملکرد است. درمقابل، ژنوتیپ گلدشت اگرچه دارای دانه‌های درشت‌تر (نمره بالا در عامل سوم) است، اما در شرایط کم‌آبی اُفت شدید عملکرد داشته و حساس به تنش کم‌آبی است. ژنوتیپ پرنیان نیز عملکرد پایینی داشته و ژنوتیپ‌های امیر و زیس‌چینی وضعیت متوسطی نشان دادند؛ بنابراین، ژنوتیپ صفه به‌دلیل پتانسیل تولید بالا و مقاومت نسبی به کم‌آبی، به‌عنوان برترین ژنوتیپ برای برنامه‌های اصلاحی معرفی می‌شود.

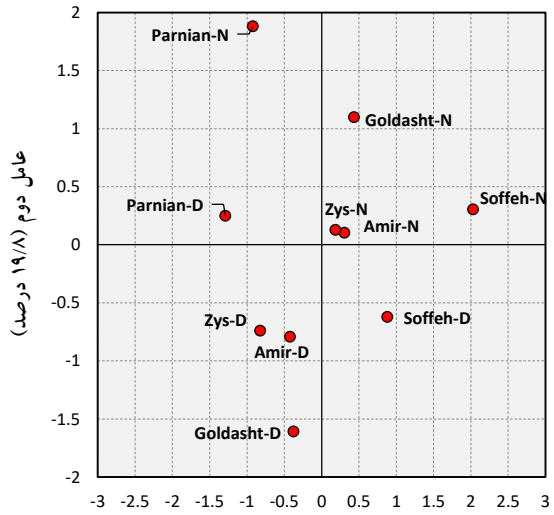
جدول ۷- تجزیه به عامل‌ها برای صفات موردمطالعه در ژنوتیپ‌های گلرنگ بر اساس داده‌های تلفیقی آبیاری کامل و تنش کم‌آبی

صفت	اختصار صفت	ضرایب عامل‌های مشترک		
		عامل اول	عامل دوم	عامل سوم
وزن کل غوزه	THW	۰/۹۹۵	۰/۰۹۷	۰/۰۳۳
وزن کل زیست‌توده	TWF	۰/۹۳۰	۰/۰۴۱	-۰/۳۰۶
عملکرد کل دانه	TGY	۰/۸۹۲	-۰/۱۳۹	-۰/۰۱۰
عرض برگ	LW	۰/۷۸۰	۰/۴۶۲	-۰/۱۱۵
ارتفاع بوته	PH	۰/۷۵۹	۰/۱۱۴	-۰/۵۳۱
تعداد شاخه‌های جانبی	NBP	۰/۷۱۱	۰/۰۵۷	-۰/۰۸۸
قطر ساقه	SD	۰/۶۹۴	۰/۴۲۴	-۰/۳۶۶
طول برگ	LL	-۰/۰۲۷	۰/۹۵۲	۰/۰۴۳
سطح برگ	LA	۰/۲۶۴	۰/۷۳۶	-۰/۵۰۵
قطر غوزه	HD	۰/۱۸۹	۰/۵۲۷	۰//۳۵۵
درصد کل روغن	OSP	۰/۲۰۷	۰/۵۰۷	۰/۱۸۴
وزن هزار دانه	TGW	-۰/۲۸۴	۰/۲۱۸	۰/۸۹۶
وزن ۲۰ غوزه	TPW	-۰/۰۴۴	-۰/۳۲۱	۰/۸۴۴
مقدار ویژه		۶/۱	۲/۲	۱/۸
واریانس (درصد)		۳۸/۹	۱۹/۸	۱۸/۹
واریانس تجمعی (درصد)		۳۸/۹	۵۸/۷	۷۷/۷

ضرایب با مقادیر بالای ۰/۵ معنی‌دار در نظر گرفته‌شده است.

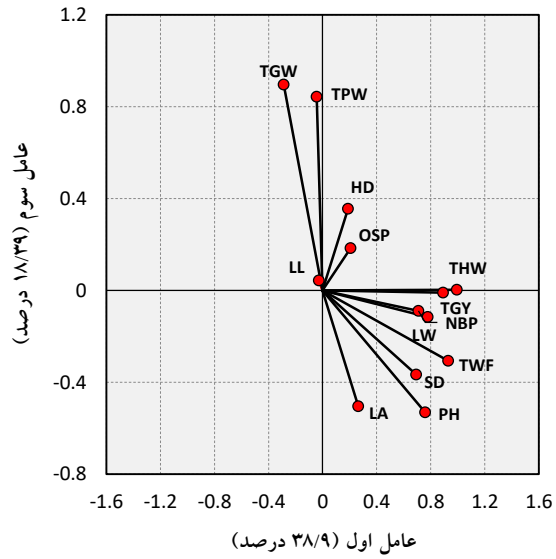


الف) روابط بین صفات موردمطالعه بر اساس دو عامل اول و دوم

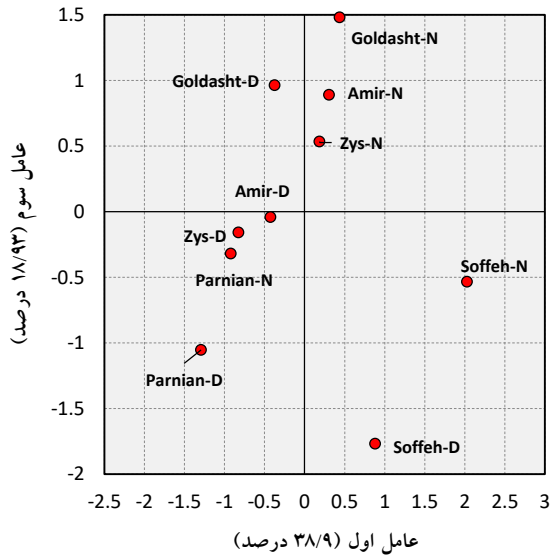


ب) پراکنش ژنوتیپ‌های گلرنگ موردمطالعه بر اساس دو عامل اول و دوم

شکل ۳- پراکنش صفات و ژنوتیپ‌های گلرنگ بر اساس دو عامل اول و دوم در شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی. سهم عامل اول ۳۸/۹ درصد و عامل دوم ۱۹/۸ درصد می‌باشد. LL: طول برگ، LW: عرض برگ، LA: سطح برگ SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، NBP: تعداد شاخه جانبی، HD: قطر غوزه، TGW: وزن هزار دانه، TGY: عملکرد کل دانه، THW: وزن کل غوزه، TPW: وزن ۲۰ غوزه، TWF: وزن کل زیست‌توده، OSP: درصد کل روغن.



الف) روابط بین صفات موردمطالعه بر اساس دو عامل اول و سوم



ب) پراکنش ژنوتیپ‌های موردمطالعه بر اساس دو عامل اول و سوم

شکل ۴- پراکنش صفات و ژنوتیپ‌های گلرنگ بر اساس دو عامل اول و سوم در شرایط آبیاری کامل و تنش کم‌آبی. سهم عامل اول ۳۸/۹ درصد و عامل دوم ۱۸/۹ درصد می‌باشد. LL: طول برگ، LW: عرض برگ، LA: سطح برگ SD: قطر ساقه، PH: ارتفاع بوته، NBP: تعداد شاخه جانبی، HD: قطر غوزه، TGW: وزن هزار دانه، TGY: عملکرد کل دانه، THW: وزن کل غوزه، TPW: وزن ۲۰ غوزه، TWF: وزن کل زیست‌توده، OSP: درصد کل روغن.

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش نشـــان داد که تنش کم‌آبی پس از گلدهی با تأثیر معنی‌دار بر کلیه صـــفات مورفولوژیکی و عملکردی، مو جب کاهش رشـــد رویشـــی و زایشـــی ژنوتیپ‌های گلرنگ شـــد، اما پاســـخ ژنوتیپ‌ها به تنش ناهمگن بود و تنوع ژنتیکی قابل‌توجهی را آشـکار سـاخت؛ به‌طوری‌که تجزیه‌های آماری حاکی از برتری مطلق ژنوتیپ صـــفه در حفظ ارتفاع بوته، زیســـت‌توده، وزن کل غوزه و عملکرد دانه تحت تنش بود، درحالی‌که ژنوتیپ‌های پرنیان و امیر بیشـــترین ا فت عملکرد را تجر به کرد ند. تحل یل همب ستگی‌ها ن شان داد که در شرایط آبیاری کامل، رابطه مثبت بین عملکرد و درصـــد روغن امکان بهبود هم‌زمان کمّیت و کیفیت را فراهم می‌کند، اما تحت تنش کم‌آبی این رابطه به ســـمت منفی تغییر یافت که بیانگر رقابت منابع کربنی و مبادله بین عملکرد و کیفیت اســـت. تحلیل عاملی نیز با شناسایی سه عامل اصلی عملکرد کلی، صفات رویشی و اندازه دانه، تأیید نمود که ژنوتیپ صفه با کسب بالاترین مقدار در عامل اول و حفظ موقعیت پایدار در شرایط تنش کم‌آبی، به‌عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ شناخته می‌شـــود، درحالی‌که ژنوتیپ گلدشـــت باوجود داشـــتن دانه‌های درشـــت‌تر، به تنش حســـاس اســـت. در مجموع، با توجه به پایداری عملکرد، حفظ زیســـت‌توده و مقاومت نسبی در کاهش درصد روغن، ژنوتیپ صفه به‌عنوان برترین منبع ژنتیکی برای اســـتفاده مســـتقیم در مناطق کم‌آب یا به‌عنوان والد برتر در برنامه‌های اصلاحی جهت توسعه ارقام متحمل به کم‌آبی معرفی می‌گردد و نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که گزینش هم‌زمان برای عملکرد بالا، دانه درشت و درصد روغن مطلوب تحت تنش کم‌آبی، مستلزم به‌کارگیری شـاخص‌های چندصـفتی و توجه به برهم‌کنش ژنوتیپ × محیط است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

این پژوهش بر اســـاس نتایج حاصـــل از اجرای پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول است. بدین‌وسیله از تمامی متصدیان دانشکده کشاورزی و مجموعه مدیریت دانشگاه بوعلی‌ســـینا برای در اختیار قرار دادن امکانات لازم برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

Acevedo, M., Pixley, K., Zinyengere, N., Meng, S., Tufan, H., Cichy, K., Bizikova, L., Isaacs, K., Ghezzi-Kopel, K., & Porciello, J. (2020). A scoping review of adoption of climate-resilient crops by small-scale producers in low-and middle-income countries. *Nature Plants*, *6*(10), 1231-1241. http://doi.org/10.1038/s41477-020-00783-z

Afzal, O., Ahmed, M., Khattak, S. H., *et al*. (2025). Phenotypic plasticity of safflower genotypes in response to contrasting climatic conditions. *Plant Molecular Biology Reporter*, *43*, 2272-2284. http://doi.org/10.1007/s11105-025-01608-z

Ali, F., *et al*. (2024). Genome-wide association mapping in safflower (Carthamus tinctorius L.) for genetic dissection of drought tolerance and yield components. *Scientific Reports*, *14*, 31257. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82932-4

Alkhedir, G. M., & Taniguchi, T. (2024). Morphological and physiological adaptation of crops under projected climate scenarios in arid regions. *Acta Oecologica*, *122*, 103976. https://doi.org/10.1016/j.actao.2023.103976

Amini, H., Arzani, A., & Bahrami, F. (2013). Seed yield and some physiological traits of safflower as affected by water deficit stress. *International Journal of Plant Production*, *7*(3). http://doi.org/10.22069/ijpp.2013.1120

Belikina, A., & Sukhareva, E. (2021). The role of dyeing safflower in ensuring food security of the Volgograd region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. http://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012196

Bharathi, Y., Jaffarbasha, S., & Manjunath, J. (2020). Line × Tester analysis for yield and quality characters in Natu tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 11(3), 764-768. http://doi.org/10.37992/2020.1103.126

Bhattarai, N., Shrestha, A. K., Dangol, R., & Singh, N. (2022). Effect of foliar spray of gibberellic acid (GA3) and borax on growth, productivity, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under protected

structure at Kaski, Nepal. *International Journal of Applied Agriculture*, *3*(1), 37-41. http://doi.org/10.52804/ijaas2022.316

Bijanzadeh, E., Moosavi, S. M., & Bahadori, F. (2022). Quantifying water stress of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. *Heliyon*, *8*(3). http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010

Canavar, Ö., Götz, K., Koca, Y. O., & Ellmer, F. (2014). Relationship between water use efficiency and 13C isotope discrimination of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress. *Turkish Journal of Field Crops*, *19*, 203.

Cerrotta, A., Lindström, L. I., & Echenique, V. (2020). Selection tools for oil content and fatty acid composition in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Breeding Science*, *70*(5), 558-566. http://doi.org/10.1270/jsbbs.20053

Choi, S. J., Lee, Z., Kim, S., Jeong, E., & Shim, J. S. (2023). Modulation of lignin biosynthesis for drought tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1116426. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1116426

Dong, J., Fu, H., Wang, Z., Zhang, L., Liu, Z., Hu, Y., Shen, F., & Wang, W. (2025). Mechanisms of strigolactone-regulated abiotic stress responses in plants. *Plants*, *14*, 2582. https://doi.org/10.3390/plants14162582

Eslam, B. P., Monirifar, H., & Ghassemi, M. T. (2010). Evaluation of late season drought effects on seed and oil yields in spring safflower genotypes. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *34*(5), 373-380. https://doi.org/10.3906/tar-0904-43

Esmaeilzadeh, M., Babazadeh, H., Naghavi, H., Saremi, A., & Shiresmaeili, G. (2022). Growth, photosynthesis and production of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in response to different levels of salinity and drought. *International Agrophysics*, *36*(2), 93-104. http://doi.org/ 10.31545/intagr/147892

FAO. (2022). FAOSTAT: Production – Crops and livestock products. FAO.

Farasat, M., Sajedi, N., & Mirzakhani, M. (2012). Evaluation of effect of drought stress on yield and yield components of safflower genotypes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *10*(2), 346-353. (In Persian)

Ghaffari, M., Gholizadeh, A., Rauf, S., & Shariati, F. (2023). Drought-stress induced changes of fatty acid composition affecting sunflower grain yield and oil quality. *Food Science & Nutrition*, *11*(12), 7718-7731. https://doi.org/10.1002/fsn3.3690

Ghamarnia, H., & Sepehri, S. (2010). Different irrigation regimes affect water use, yield and other yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) crop in a semi-arid region of Iran. *Journal of Food Agriculture and Environment*, *8*, 590-593.

Ghodsi, M., Chaeichi, M., Mazaheri, D. & Jalal Kamali, M. (2004). Determination of susceptibility of developmental stages in bread wheat to water stress and its effect on yield and yield components. Seed and Plant Journal, *20*(4), 489-509. http://doi.org/10.22092/spij.2017.110630

Harsha, S. G., Girish, B., Dinsha, M., Patil, M. I., Singh, T. H., & Prathibha, M. D. (2024). Metabolomic and enzymatic responses of oilseed crops to terminal drought stress: Implications for lipid biosynthesis. *Scientia Horticulturae*, 325, 112633.

Hassani, S. M. R., Pourdad, S. S., Naji, A. M., Fayaz, F., Pirseyedi, S. M., Sheikhizadeh Anari, S., & Talebi, R. (2024). Genome-wide association mapping in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) for genetic dissection of drought tolerance using DArTseq markers. *Scientific Reports*, *14*(1), 31490. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82932-4

Hussain, M. I., Lyra, D. A., Nikos, N., Farooq, M., & Ahmad, N. (2015). Salt and drought stresses in safflower: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*, 1. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8

Jabbari, H., Fanaei, H. R., Shariati, F., Sadeghi Garmarodi, H., Abasali, M., & Omidi, A. H. (2024). Comparison of genetic diversity of Iranian and foreign safflower genotypes using multivariate statistical methods. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *33*(4), 131-148. (In Persian). https://doi.org/10.22034/saps.2023.50121.2821

Johnson, C. M., & Ulrich, A. (1959). Analytical methods for use in plant analysis.

Joshan, Y., Sani, B., Jabbari, H., Mozafari, H., & Moaveni, P. (2019). Effect of drought stress on oil content and fatty acids composition of some safflower genotypes. *Plant, Soil and Environment*, *65*(11), 563-567. https://doi.org/10.17221/591/2019-PSE

Joshan, Y., Sani, B., Jabbari, H., Mozafari, H., & Moaveni, P. (2020). The effect of late season drought stress on some morphophysiological characteristics of Iranian safflower varieties in Karaj region. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *13*(4), 1093-1104. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3193.1815

Kammili, A., & Yadav, P. (2022). Enhancing oleic acid and oil content in low oil and oleic type Indian safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Industrial Crops and Products*, *175*, 114254. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114254

Kang, Z., *et al*. (2024). Climate-driven water deficit projections and adaptive crop strategies in semi-arid Iran. *Environmental and Experimental Botany*, *219*, 105630. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101075

Karizi, A., Ahmadi, S. H., Honar, T., & Sepaskhah, A. R. (2025). Safflower gas exchange, leaf water potential, and water-saving irrigation in surface and subsurface drip irrigation systems at different lateral spacings. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 1633. https://doi.org/10.1186/s12870-025-07537-z

Khalid, N., Khan, R. S., Hussain, M. I., Farooq, M., Ahmad, A., & Ahmed, I. (2017). A comprehensive characterisation of safflower oil for its potential applications as a bioactive food ingredient-A review. *Trends in Food Science & Technology*, *66*, 176-186. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.009

Kizil, S., Çakmak, Ö., Kirici, S., & Inan, M. (2008). A comprehensive study on safflower (Carthamus tinctorius L.) in semi-arid conditions. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *22*(4), 947-953.

Koç, H. (2021). Selection criteria for yield in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under rainfed conditions. *Grasas y Aceites*, *72*(3), e421. https://doi.org/10.3989/gya.0449201

La Bella, S., Tuttolomondo, T., Lazzeri, L., Matteo, R., Leto, C., & Licata, M. (2019). An agronomic evaluation of new safflower *(Carthamus tinctorius* L.) germplasm for seed and oil yields under Mediterranean climate conditions. *Agronomy*, *9*, 468. https://doi.org/10.3390/agronomy9080468

Licata, M., Farruggia, D., Iacuzzi, N., Matteo, R., Tuttolomondo, T., & Di Miceli, G. (2023). Effects of genotype and climate on productive performance of high oleic Carthamus tinctorius L. under rainfed conditions in a semi-arid environment of Sicily (Italy). *Plants*, *12*(9), 1733. https://doi.org/10.3390/plants12091733

Maghsoudi, E., Yadavi, A., Balouchi, H., Dehnavi, M. M., Piri, R., & Mastinu, A. (2024). Improving the physiological properties and yield of safflower by combining organic and chemical nitrogen in different irrigation cut-off conditions. *Industrial Crops and Products*, *222*, 119601. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119601

Manikanta, C., Pasala, R., Kaliamoorthy, S., Basavaraj, P. S., Pandey, B. B., Vadlamudi, D. R., Nidamarty, M., Guhey, A., & Kadirvel, P. (2023). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) crop adaptation to residual moisture stress: Conserved water use and canopy temperature modulation are better adaptive mechanisms. *PeerJ*, *11*, e15928. https://doi.org/10.7717/peerj.15928

Mohammad Shahid, M. S., Fida Mohammad, F. M., & Mohammad Tahir, M. T. (2002). Path coefficient analysis in wheat.

Mohammadi, M., Ghassemi-Golezani, K., Chaichi, M., & Safikhani, S. (2018). Seed oil accumulation and yield of safflower affected by water supply and harvest time. *Agronomy Journal*, *110*(2), 586-593. https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0365

Mohtashami, F., Tadayon, M. R., & Roshandel, P. (2018). Evaluation of the effect of deficit irrigation regimes on grain yield and yield components of safflower genotypes. *Journal of Crops Improvement*, *20*(2), 547-561. (In Persian)

Mostafa, H., & Afify, M. T. (2022). Influence of water stress on engineering characteristics and oil content of sunflower seeds. *Scientific Reports*, *12*(1), 12418. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16271-7

Mosupiemang, M., Emongor, V. E., & Malambane, G. (2022). A review of drought tolerance in safflower. *International Journal of Plant and Soil Science*, 140-149. https://doi.org/10.9734/ijpss/2022/v34i1030930

Mosupiemang, M., Emongor, V. E., & Malambane, G. (2025). The response of safflower genotypes to drought stress induced at the rosette stage. *Journal of Aridland Agriculture*, *11*, 69-76.

Mozaffari, K., & Asadi, A. A. (2006). Relationships among traits using correlation, principal components and path analysis in safflower mutants sown in irrigated and drought stress condition. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5, 977-983.

Mulugeta, S. M., Sárosi, S., & Radácsi, P. (2023). Drought-resilient oilseed crops: Agronomic and physiological perspectives for sustainable production. *Industrial Crops and Products*, *205*, 117545. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8346-8_10

Nazari, M., Shariati, F., Sadeghi Garmaroodi, H., & Jabbari, H. (2022). Evaluation of genetic diversity in 273 safflower genotypes collected from different regions of the world. *Journal of Crop Breeding*, *14*(44), 174-180. (In Persian)

Nezhad, T. H., & Talebi, R. (2015). Interrelationships between agronomic traits with seed yield in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under different irrigation regimes. *Biological Forum - An International Journal*, *7*(2), 430-435.

Oddo, E., Abbate, L., Inzerillo, S., Carimi, F., Motisi, A., Sajeva, M., & Nardini, A. (2020). Water relations of two Sicilian grapevine cultivars in response to potassium availability and drought stress. *Plant Physiology and Biochemistr*y, 148, 282-290. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.025

Ojaq, S. M. M., Mozafari, H., Jabbari, H., & Sani, B. (2020). Evaluation of yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under semi-arid conditions. *Plant Genetic Resources*, *18*(4), 270-277. https://doi.org/ 10.1017/S1479262120000301

Pavithra, K., Patil, R. S., Harijan, Y., & Nishanth, G. (2016). Correlation and path analysis studies in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 7(2), 428-432. https://doi.org/3263-0512-2015-109

Pearl, S. A., Bowers, J. E., Reyes-Chin-Wo, S., Michelmore, R. W., & Burke, J. M. (2014). Genetic analysis of safflower domestication. *BMC Plant Biology*, *14*, 43.

Raeisi, N., Beheshti, B., & Sharifnasab, H. (2020). Design, construction and evaluation of a picking safflower harvesting machine. *Agricultural Mechanization and Systems Research*, *21*(74), 237-250. (In Persian). https://doi.org/10.22092/erams.2020.126556.1317

Rahimi, M. (2021). Genetic diversity, population structure and screening of molecular markers associated to agronomic traits in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Iranian Journal of Science and Technology*, 45, 1549-1560. https://doi.org/10.1007/s40995-021-01161-w

Sajid, M., Munir, H., Rauf, S., Ibtahaj, I., Paray, B. A., Kiełtyka-Dadasiewicz, A., Głowacka, A., & Ahmed, M. A. (2024). How climate variability affects safflower (*Carthamus tinctorius* L.) yield, oil, and fatty acids in response to sowing dates. *Horticulturae*, *10*(6), 539. https://doi.org/10.3390/horticulturae10060539

Salami, M., Tan, H., Alizadeh, B., & Heidari, B. (2025). Multi-trait selection indices (MGIDI) for screening drought-tolerant genotypes based on photosynthetic and morphological stability. *Field Crops Research*, *322*, 109733. https://doi.org/10.3390/plants14010035

Shahrokhnia, M. H., *et al*. (2020). Photosynthetic limitations and yield reduction in safflower under water deficit: A mechanistic approach. *Journal of Plant Physiology*, *254*, 153287. https://doi.org/ 10.3390/agriculture13030558

Shekari, F., Sabaghnia, N., Abbasi, A., & Baljani, R. (2025). Evaluation of important traits affecting yield in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Genetika, *57*(1), 23-35. https://doi.org/10.2298/GENSR2501023S

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). Plant physiology and development (6th ed.). Sinauer Associates Inc.: Sunderland, MA, USA.

Tayebi, A., Mirshekari, B., Tarinejad, A., & Yarnia, M. (2018). Effect of shoot application of salicylic acid on some growth parameters and yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under water stress. (In Persian). https://doi.org/20.1001.1.20085958.1397.10.32.7.2

Yang, J., Han, L., Zhao, X., Zhao, Z., Yang, J., Wang, F., & Du, L. (2025). Physiological response of safflower to water deficit and genome-wide identification of its NAC transcription factor family. *Scientific Reports*, 15(1), 31257. https://doi.org/10.1038/s41598-025-16483-7

Yavas, I., Jamal, M. A., Ul Din, K., Ali, S., Hussain, S., & Farooq, M. (2024). Drought-induced changes in leaf morphology and anatomy: Overview, implications and perspectives. *Polish Journal of Environmental Studies*, *33*(2), 1517. https://doi.org/10.15244/pjoes/174476

Yeloojeh, K. A., Saeidi, G., & Sabzalian, M. R. (2020). Drought stress improves the composition of secondary metabolites in safflower flower at the expense of reduction in seed yield and oil content. *Industrial Crops and Products*, *154*, 112496. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112496

Zafari, M., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., & Sedghi, M. (2020). Safflower biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(22), 6040-6047. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06860

Zhan, P., Zhong, Z. C., Xiang, N. Y., Qin, R., Jiang, X. B., & Liu, H. (2022) . Identification of Carthamus tinctorius NAC gene family and analysis of drought stress response. *Zhongguo Zhongyao Zazhi*, *47*(20), 5520-5529 . https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.20220514.104