



Impact of Drought Stress on Growth and Yield Performance of Novel Safflower Populations Derived from Crosses Between Iranian and Foreign Accessions

Mahsa Hosseinifard¹, Mohammad Mahdi Majidi^{1*} , Ghodratollah Saeidi¹ , and Majid Mohammadi²

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Crop and Horticultural Science Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

* Corresponding author, Email: majidi@iut.ac.ir

(Received: 28 April 2025; Revised: 1 July 2025; Accepted: 21 July 2025)

Abstract

Background and Objective: Drought, as the most significant limiting factor for yield in arid and semi-arid regions, has consistently been a major challenge for safflower (*Carthamus tinctorius* L.) production. This innovative study focuses on the development and evaluation of new safflower genotypes derived from targeted crosses between indigenous samples and global genetic resources. The primary goal was to enhance genetic diversity and identify genotypes with high tolerance to drought stress.

Methods: In this research, 64 genotypes (including 10 parental genotypes, 45 F2 families resulting from their diallel crosses, and 9 check genotypes) were evaluated for phenological, morphological, and grain yield traits under two environments: severe drought stress (90% available water depletion) and normal conditions (50% available water depletion).

Results: The results demonstrated remarkable success in generating unprecedented genetic diversity through the integration of exotic germplasm, providing immense potential for improving agricultural traits under drought stress. Analyses indicated high heritability for grain yield-related traits under non-stress conditions, and a significant correlation between plant height and thousand-grain weight with grain yield was observed in the drought stress environment. The most crucial discovery of this research was the identification of superior drought-resistant and yield-stable populations. Specifically, population 74×67 (derived from the cross of G67 from Libya × G74 from Jordan) exhibited the most prominent drought stress tolerance and grain yield stability. Furthermore, parent G71 (Mexico) and several other populations (such as 40×86, 96×71, 9×23, 9×32, 96×86, 9×54, 74×40) were also introduced as promising genetic resources with high yield stability.

Conclusion: These findings underscore the critical role of international germplasm resources in developing drought-resistant safflower cultivars for Iran's water-scarce regions, representing a fundamental step towards enhancing food security and agricultural productivity.

Keywords: Water deficit, Oil crops, Variation, Heritability, Yield stability.

How to Cite: Hosseinifard, M., Majidi, M.M., Saeidi, G., Mohammadi, M., 2025. Impact of drought stress on growth and yield performance of novel safflower populations derived from crosses between Iranian and foreign accessions. J. Soil Plant Interact. 16(2), 39–59 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.16.2.03603>





تأثیر تنش خشکی بر رشد و عملکرد جمعیت‌های حاصل از تلاقی نمونه‌های ایرانی و خارجی گلرنگ

مهسا حسینی‌فرد^۱، محمدمهدی مجیدی^{۱*}، قدرت‌الله سعیدی^۱ و مجید محمدی^۲

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: majidi@iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۳۰)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: خشکی، به عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد در مناطق خشک و نیمه‌خشک، همواره چالش اصلی تولید گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) بوده است. این پژوهش بر پایه توسعه و ارزیابی ژنوتیپ‌های جدید گلرنگ حاصل از تلاقی‌های هدف‌مند بین نمونه‌های بومی و ذخایر ژنتیکی جهانی متمرکز شد و هدف اصلی آن افزایش تنوع ژنتیکی و شناسایی ژنوتیپ‌های با تحمل زیاد به تنش خشکی بود. **روش‌ها:** در این پژوهش ۶۴ ژنوتیپ که شامل ۱۰ ژنوتیپ والدی، ۴۵ فامیل F2 حاصل از تلاقی دای‌آل یک‌طرفه آن‌ها به همراه ۹ ژنوتیپ شاهد در دو محیط تنش خشکی (۹۰٪ تخلیه آب قابل استفاده) و معمول (۵۰٪ تخلیه آب قابل استفاده) از نظر صفات فنولوژیک، مورفولوژیک و عملکرد دانه بررسی شدند.

نتایج: نتایج حاکی از ایجاد تنوع ژنتیکی زیاد از راه ادغام خزانه‌های ژنی خارجی بود، که پتانسیل خوبی برای اصلاح صفات زراعی تحت تنش خشکی فراهم می‌آورد. تحلیل‌ها نشان داد که وراثت‌پذیری صفات مرتبط با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش بوده و همبستگی معنی‌داری بین ارتفاع بوته و وزن هزار دانه با عملکرد دانه در محیط تنش خشکی وجود دارد. جمعیت‌های برتر مقاوم به خشکی و پایدار از نظر عملکرد شناسایی شدند. به طور خاص، جمعیت ۶۷×۷۴ (حاصل از تلاقی G67 از لیبی × G74 از اردن)، برجسته‌ترین تحمل به تنش خشکی و پایداری عملکرد دانه را به نمایش گذاشت. علاوه بر این، والد G71 (مکزیک) و چندین جمعیت دیگر (مانند 40×86، 96×71، 9×23، 9×32، 96×86، 9×54، 74×40) نیز به عنوان منابع ژنتیکی امیدبخش با پایداری عملکرد زیاد معرفی شدند.

نتیجه‌گیری کلی: این یافته‌ها بر نقش حیاتی منابع ژرم‌پلاسما بین‌المللی در توسعه ارقام گلرنگ مقاوم به خشکی برای مناطق کم‌آب ایران تأکید دارد، که گامی اساسی در راستای افزایش امنیت غذایی و بهره‌وری کشاورزی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کم‌آبی، دانه‌های روغنی، تنوع، وراثت‌پذیری، پایداری عملکرد.



مقدمه

گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L) یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی است که در سال‌های اخیر به دلیل سازگاری وسیع به اقلیم‌های گوناگون و تحمل نسبی به خشکی، به عنوان یکی از گیاهان دانه روغنی مهم برای نواحی خشک و نیمه خشک دنیا از جمله ایران مورد توجه قرار گرفته است (Majidi et al., 2024). علی‌رغم این‌که گلرنگ از تحمل زیادی نسبت به تنش کمبود آب، کیفیت بالای روغن و خاصیت دارویی برخوردار است، ولی میزان عملکرد دانه این گیاه کم بوده و درصد روغن دانه آن نیز چندان زیاد نیست (Ebrahimi et al., 2016). بنابراین موفقیت کشت و تولید تجاری گلرنگ نیازمند برنامه‌های اصلاحی برای افزایش عملکرد و کیفیت دانه خواهد بود. از طرفی هر برنامه اصلاحی نیازمند وجود تنوع ژنتیکی و درک چگونگی توارث شناخت عمل ژن برای صفات مورد نظر است (Mohammadi et al., 2021).

تنش خشکی یکی از تنش‌های چندبُعدی است که منجر به تغییرات مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی در گیاهان شده و تأثیر منفی بر رشد و تولید آن‌ها دارد و در نهایت منجر به کاهش عملکرد نهایی می‌شود (Pirnajmedin et al., 2024). خشکی سبب بسته‌شدن روزنه‌ها، محدودیت تبادل گازی و کاهش فتوسنتز می‌شود. تنش خشکی در طول دوره رشد رویشی از راه کاهش سطح برگ فعال فتوسنتزی و در دوره زایشی از راه کاهش طول دوره رشدی باعث کاهش عملکرد دانه می‌شود (Haghpahan et al., 2024). پژوهش‌های زیادی نشان داده است که تنش خشکی در همه مراحل آثار منفی بر رشد و نمو گلرنگ دارد. ولی اثر تنش خشکی در مرحله مرحله گل‌دهی بیشتر است زیرا گرده‌افشانی را کاهش می‌دهد و بنابراین تعداد دانه تشکیل‌شده در غوزه کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه می‌شود (Joshi et al., 2020). نتایج پژوهش‌ها نیز نشان داده که با افزایش شدت تنش خشکی ارتفاع بوته، تعداد طبق در بوته، تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و درصد روغن گلرنگ کاهش می‌یابد (Joshi et al., 2020).

(Mothashmi et al., 2020).

محدودیت‌های ژنتیکی گیاهان اهلی و تصمیم‌های انسانی در اکوسیستم‌های مصنوعی، باعث کاهش تنوع ژنتیکی محصول‌های کشاورزی جدید شده و آن‌ها را در برابر تنش‌های محیطی آسیب‌پذیرتر کرده است (Huang et al., 2016). از این رو، حفظ تنوع ژنتیکی پیش‌نیاز ضروری و بسیار مهم برای تولید پایدار در آینده است (Henkrar et al., 2016). گلرنگ دارای مراکز تنوع متعددی در جهان بوده و از شرق هند تا غرب عراق و حتی آفریقا گسترده شده است. پژوهش‌های مورفولوژیک و مولکولی پیشین نشان می‌دهد که تنوع قابل‌توجهی در ژرم‌پلاسما جهانی این گیاه وجود دارد (Ebrahimi et al., 2016)، بنابراین توسعه منابع ژرم پلاسما از راه وارد کردن ژنوتیپ‌های جدید می‌تواند کارایی برنامه‌های اصلاحی گلرنگ کشور را بهبود بخشد (Mirabadi et al., 2018). بررسی تنوع ژنتیکی نه تنها برای سازمان‌دهی و حفاظت مواد گیاهی، بلکه برای استفاده از پدیده هتروزیس و تولید بذور دورگ نیز اهمیت دارد. درک و آگاهی از تنوع و شباهت ژنتیکی افراد در درون جمعیت‌ها، برای استفاده مؤثر از منابع ژنتیکی در یک برنامه اصلاحی مفید است (Safavi et al., 2010).

نتایج پژوهشی به‌منظور بررسی پایداری یک کلکسیون جهانی گلرنگ و تجزیه ژنتیکی صفات مختلف تحت شرایط رطوبتی بدون تنش و تنش خشکی در سه منطقه اصفهان، جیرفت و کرمان نشان داد که ارقام ایرانی از محتوی روغن دانه بیشتری نسبت به ارقام خارجی برخوردار بوده ولی ارقام خارجی عملکرد و تحمل تنش خشکی بیشتری داشتند (Ebrahimi et al., 2016). همچنین نتایج پژوهش دیگری به‌منظور ارزیابی تحمل خشکی در ژنوتیپ‌های گلرنگ زراعی بیش از ۲۰ کشور دنیا، نشان داد که تنوع قابل‌توجهی در ژرم پلاسما خارجی وجود دارد (Malkinejad and Majidi, 2015) که منجر به انتخاب والدین پژوهش حاضر نیز شد. در گام بعدی به‌منظور بازترکیبی نمونه‌های منتخب و ایجاد تنوع ژنتیکی جدید برای تحمل خشکی، والدین انتخاب شده و پس از تلاقی و خودگشتی لاین‌های نسل

جدول ۱. اطلاعات والدین گلرنگ برای تلاقی و ایجاد ۴۵ جمعیت جدید مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. The parental safflower information used for crossing and creating the 45 new populations in this study

شماره والد	کد	منشأ	ویژگی (مبنای انتخاب والد برای مطالعه ژنتیکی)
Parent number	Code	Origin	Trait (basis for parent selection for genetic study)
G9	PI253519	اتریش Austria	حساس از نظر صفات مختلف Sensitive in terms of various traits
G23	PI393988	پرتغال-آزورس Portugal, Azores	وزن هزار دانه زیاد - دیررس High thousand-grain weight - late maturity
G32	PI305527	سودان Sudan	شاخص تحمل تنش خشکی زیاد High drought stress tolerance index
G40	PI369847	تاجیکستان Tajikistan	وزن هزار دانه، عملکرد روغن، تعداد دانه در غوزه، شاخص تحمل خشکی و ترکیب پذیری عمومی زیاد Thousand-grain weight, oil yield, number of seeds per boll, drought tolerance index, and high general compatibility
G54	PI653202	هند India	وزن هزار دانه زیاد High thousand-grain weight
G67	CART 70	لیبی Libyen	تعداد دانه در غوزه زیاد High number of seeds per pod
G71	PI537652	مکزیک Mexico	حساس به خشکی - ناپایدار عمومی Drought sensitive - generally unstable
G74	PI657820	اردن Jordan	وزن هزار دانه و شاخص تحمل خشکی زیاد High thousand-grain weight and drought tolerance index
G86	Koseh	ایران-اصفهان Iran-Isfahan	تعداد غوزه و ارتفاع زیاد - دیررس High number of heads and height - late maturity
G96	Iran-Kermanshah	ایران-کرمانشاه Iran-Kermanshah	درصد روغن زیاد High oil content

مواد و روش‌ها

مواد ژنتیکی

در این پژوهش ۶۴ ژنوتیپ شامل ۴۵ جمعیت F_2 حاصل از تلاقی دای آلل 10×10 یک طرفه به همراه ۱۰ والد آن‌ها و ۹ رقم شاهد در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در لورک نجف‌آباد در سال ۱۴۰۱-۰۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. والدین تلاقی پیش از این توسط Ebrahimi et al (2016) از بین ۱۰۰ ژنوتیپ داخلی و خارجی گلرنگ انتخاب شدند (جدول ۱). این

اول، جمعیت نسل دوم (F_2) ایجاد شد. این پژوهش با هدف ارزیابی تنوع ژنتیکی فامیل‌های F_2 حاصل از تلاقی متقابل لاین-های گلرنگ داخلی و خارجی در کنار نمونه‌های شاهد ایرانی در شرایط بدون تنش و تنش خشکی انجام شد. شناخت تفکیک یافته‌های جدید در نسل F_2 به عنوان منابع ژنی جدید احتمالی برای تحمل خشکی در گلرنگ و انتخاب تک‌بوت‌های برتر از درون جوامع از دیگر اهداف این پژوهش بود.

(شرکت آذر خاک آب ارومیه) استفاده شد و عمق آب مورد نیاز هر تیمار از فرمول زیر محاسبه شد:

$$I = (\theta_{FC} - \theta_{irri}) \times B \times D \quad (1)$$

که در این فرمول، I عمق آب آبیاری بر حسب سانتی‌متر، B چگالی ظاهری خاک (برابر $1/4$ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D عمق توسعه ریشه (برابر 60 سانتی‌متر)، FC رطوبت وزنی خاک در حد گنجایش مزرعه، θ_{irri} میانگین رطوبت وزنی در لایه توسعه ریشه هنگام آبیاری (برای تیمار بدون تنش در زمان 50 درصد تخلیه آب قابل استفاده و برای تیمار تنش خشکی در زمان 90 درصد تخلیه آب قابل استفاده) است. سپس حجم آبیاری بر حسب لیتر از فرمول $V = I \times A$ به دست آمد که A مساحت کرت بر حسب متر مربع و I عمق آبیاری بر حسب میلی‌متر است. نوع آبیاری به صورت قطره‌ای بود و برای اندازه‌گیری حجم آب ورودی کرت‌ها از کنتور استفاده شد.

ثبت مراحل فنولوژیک از جمله روز تا تکمه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی از ابتدای کاشت تا مرحله مذکور انجام شد. صفات مورفولوژیک و زراعی شامل ارتفاع بوته، تعداد انشعاب در هر بوته، تعداد غوزه در هر بوته، وزن هزار دانه، قطر غوزه و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. همچنین به منظور ارزیابی دقیق‌تر واکنش 64 ژنوتیپ گلرنگ نسبت به دو محیط بدون تنش و تنش خشکی، از شاخص‌های تحمل تنش و پایداری استفاده شد. شاخص پایداری عملکرد (YSI^1) از معادله 2 محاسبه شد که در آن Y_p و Y_s به ترتیب مقادیر عملکرد هر ژنوتیپ در شرایط تنش و بدون تنش می‌باشند:

$$YSI = \frac{Y_s}{Y_p} \quad (2)$$

همچنین برای شناسایی لاین‌های متحمل به تنش، شاخص ترکیبی تحمل (CSI^2) نیز استفاده شد. برای محاسبه شاخص CSI ترکیبی خطی از شاخص‌های STI^3 ، GMP^4 ، HM^5 و MP^6 استفاده می‌شود (Sabouri et al., 2022).

ژنوتیپ‌ها شامل ژنوتیپ‌های 86 (از اصفهان)، 23 (از پرتغال)، 71 (از مکزیک)، 40 (از تاجیکستان)، 96 (از کرمانشاه)، 32 (از سودان)، 54 (از هند)، 74 (از اردن)، 9 (از اتریش) و 67 (از لیبی) بودند (جدول ۱) و از کشورهای مختلف جهان و بر اساس شاخص انتخاب (Smith (1936) و Hazel (1943) برای صفات مهم زراعی (عملکرد دانه، عملکرد روغن، تعداد غوزه در بوته، تعداد دانه در غوزه، وزن هزار دانه، محتوای روغن دانه، زمان رسیدگی و ارتفاع) و حدود بالا و پایین میانگین صفات عملکرد، اجزای عملکرد و محتوای روغن دانه انتخاب شدند. سپس تلاقی بین آن‌ها توسط (Ebrahimi et al (2016) انجام شد و نسل اول توسط آن‌ها ارزیابی و پس از خودگشن شدن نتاج نسل دوم حاصل شد که مواد ژنتیکی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهند.

روش اجرای طرح و صفات مورد بررسی

در این پژوهش، ژنوتیپ‌ها که شامل جامعه F_2 حاصل از 45 تلاقی بودند به همراه 10 والد آن‌ها و 9 ژنوتیپ شاهد، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با 2 تکرار و به طور جداگانه در دو محیط تنش خشکی و بدون تنش در مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفتند. کشت در روز 10 آذر سال 1401 به صورت دستی انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل دو خط کشت یک متری بود و فاصله بین واحدهای آزمایشی 70 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله‌ی بوته‌ها روی هر خط کشت 10 سانتی‌متر بود. در طول فصل کشت، عملیات تنک کردن، وجین و مبارزه با علف‌های هرز انجام گرفت.

اعمال تنش خشکی پیش از تکمه‌دهی انجام گرفت و تا این زمان آبیاری به طور یکسان برای همه واحدهای آزمایشی انجام شد. آبیاری تیمار بدون تنش در زمان 50 درصد تخلیه آب قابل استفاده ($MAD=50\%$) و آبیاری تیمار تنش خشکی در زمان 90 درصد تخلیه آب قابل استفاده ($MAD=90\%$) انجام گرفت. برای تعیین زمان آبیاری از دستگاه رطوبت‌سنج مدل AKA-SM01

3- Geometric mean productivity

4- Harmonic mean

5- Mean productivity

1- Yield stability index

1- Combination of significant indices

2- Stress tolerance index

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در شرایط تنش و بدون تنش انجام شد و پس از آن تجزیه واریانس مرکب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفت و تیمارها با استفاده از آزمون LSD مقایسه شدند. ضرایب همبستگی بین صفات محاسبه شد و اجزاء تشکیل دهنده واریانس با استفاده از امید ریاضی میانگین مربعات طرح آماری، برآورد شد. سپس ضرایب تنوع فنوتیپی و ژنتیکی با استفاده از نرم‌افزار SAS به دست آمد. برآورد وراثت‌پذیری عمومی صفات نیز بر مبنای میانگین واحد آزمایشی برای هر محیط رطوبتی محاسبه شد. تجزیه و تحلیل آماری به کمک نرم‌افزارهای SAS و ترسیم نمودارها و جداول به کمک نرم‌افزار STATGRAPHICS و Excel انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس برای دو محیط بدون تنش و تنش خشکی برای صفات مورد بررسی بر روی ۶۴ ژنوتیپ گیاه گلرنگ (جدول ۲ و ۳) نشان داد که اثر ژنوتیپ برای صفات روز تا تکمه‌دهی، روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، قطر غوزه، عملکرد دانه در بوته، وزن هزار دانه، در سطح ۱ درصد و برای صفت تعداد انشعاب در بوته در سطح ۵ درصد معنی‌دار است که بیان‌گر وجود تنوع ژنتیکی زیاد و امکان گزینش ژنوتیپ‌های مطلوب و استفاده از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی است.

دامنه تغییرات در اغلب صفات در هر دو محیط بدون تنش و تنش خشکی زیاد بود که نشان‌گر وجود تنوع زیاد بین لاین‌ها است (جدول ۴). به‌عنوان مثال برای صفت تعداد انشعاب در محیط بدون تنش خشکی، دامنه تغییرات از ۴/۵ الی ۱۱/۵ و در محیط تنش خشکی از ۴/۱ تا ۱۸/۰ متغیر بود. یکی دیگر از صفات مهم در بررسی عملکرد گلرنگ، وزن هزار دانه است که در محیط بدون تنش خشکی از ۲۴/۰۸ تا ۵۵/۴۴ گرم متغیر بود. وزن هزار دانه در محیط تنش خشکی کاهش یافت و دامنه آن از

۲۰/۷۰ تا ۵۵/۲۶ گرم متغیر بود که یکی از دلایل آن را می‌توان کاهش فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی در شرایط تنش دانست. به نظر می‌رسد تنش در مراحل زایشی به دلیل کاهش طول دوره پرشدن دانه، اختلال در فتوسنتز گیاه و در نتیجه کاهش تولید مواد فتوسنتزی لازم برای پرشدن دانه‌ها، باعث چروکیدگی و کاهش وزن دانه‌ها می‌شود (Seyedsharifi, 2019).

با توجه به نتایج ضرایب تنوع فنوتیپی، ژنتیکی و وراثت‌پذیری صفات مورد بررسی (جدول ۵)، بیش‌ترین ضریب تنوع فنوتیپی در محیط بدون تنش مربوط به عملکرد دانه در بوته و وزن هزار دانه و کم‌ترین مربوط به روز تا رسیدگی بود. همچنین در محیط تنش بیش‌ترین ضریب تنوع فنوتیپی را عملکرد دانه در بوته به خود اختصاص داد. بیش‌ترین ضریب تنوع ژنتیکی در محیط بدون تنش مربوط به وزن هزار دانه، تعداد انشعاب و عملکرد دانه و کم‌ترین آن‌ها مربوط به روز تا رسیدگی و روز تا گل‌دهی بود و در محیط تنش بیش‌ترین ضریب تنوع ژنتیکی مربوط به عملکرد دانه بوده و کم‌ترین را روز تا رسیدگی به خود اختصاص داده بود. در پژوهشی، ضریب تنوع ژنتیکی برای صفت عملکرد دانه در هر دو محیط در بیش‌ترین میزان در مقایسه با صفات دیگر بود (Zarei Soudani, 2021). در محیط تنش، درصد وراثت‌پذیری عمومی برای صفات روز تا گل‌دهی، روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، قطر غوزه و وزن هزار دانه، نسبت به محیط بدون تنش، کاهش یافته و برای صفات روز تا تکمه‌دهی، تعداد انشعاب در بوته، محتوی نسبی آب برگ و عملکرد دانه افزایش یافت. اگر وراثت‌پذیری یک صفت زیاد باشد، نشان می‌دهد که انتخاب برای آن صفت می‌تواند نتایج بهتری در بهبود نسل‌های آینده داشته باشد. برعکس، اگر وراثت‌پذیری کم باشد، عوامل محیطی نقش بیش‌تری در تنوع فنوتیپی داشته و انتخاب ممکن است تأثیر کم‌تری داشته باشد (Kakaei and Farshadfar, 2025).

همبستگی بین صفات در برنامه‌های اصلاحی اهمیت زیادی دارد، زیرا برای بهبود ژنتیکی صفات، آگاهی از روابط بین صفات و چگونگی اثرگذاری آن‌ها بر یکدیگر لازم است. در به‌نژادی

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات فنولوژیک و مورفولوژیک زنبیپ‌های گل‌رنگ در دو محیط بدون تنش و تنش خشکی

Table 2. The results of analysis of variance for phenological and morphological traits of safflower genotypes under two environments of non-stress and drought stress conditions

قطر غوزه (mm)	تعداد غوزه	ارتفاع بوته (cm)	روز تا رسیدگی	روز تا گل‌دهی	روز تا تکمه‌دهی	درجه آزادی	منابع تغییرات
Capitulum diameter	Number of capitula	Plant height	Days to maturity	Days to flowering	Days to budding	df	Sources of variation
93.48 *	697.62 ^{ns}	9843.12 *	4241.26 *	777.01 *	95.06 ^{ns}	1	محیط (Environment, E)
5.23	83.91	475.65	75.39	29.25	80.10	2	تکرار (Replication)
17.43 **	25.72 **	172.28 **	18.08 **	16.17 **	62.86 **	63	ژنوتیپ (Genotype, G)
5.72 ^{ns}	15.36 ^{ns}	40.77 *	11.45 *	5.93 ^{ns}	10.58 ^{ns}	63	محیط × ژنوتیپ (G × E)
7.02	13.19	28.63	7.49	4.66	9.28	126	خطا (Error)
9.86	22.58	5.35	1.26	1.20	1.81		ضریب تغییرات (Coefficient of variation)

ns, * و ** به ترتیب بیان‌گر نبود اثر معنی‌دار و آثار معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effects at the 5 and 1% levels, respectively.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات فنولوژیک و مورفولوژیک ژنوتیپ‌های گلرنگ در دو محیط بدون تنش و تنش خشکی
Table 3. The results of analysis of variance for agronomic and morphological traits of safflower genotypes under two environments of non-stress and drought stress conditions

وزن هزار دانه (g)	عملکرد دانه (g plant ⁻¹)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)	تعداد انشعاب در بوته	درجه آزادی	منابع تغییرات
Thousand-grain weight	Grain yield	Relative water content of leaf	Number of branches per plant	df	Sources of variation
44.64 ^{ns}	1388.77 [*]	26094.56 [*]	54.76 [*]	1	محیط (Environment, E)
23.63	20.06	488.72	4.36	2	تکرار (Replication)
105.8 ^{**}	21.28 ^{**}	164.22 ^{**}	2.87 [*]	63	ژنوتیپ (Genotype, G)
18.57 ^{ns}	10.31 ^{ns}	175.98 ^{**}	1.82 ^{ns}	63	محیط × ژنوتیپ (G × E)
15.97	10.43	72.35	1.76	126	خطا (Error)
10.24	22.27	12.24	18.86		ضریب تغییرات (%) (Coefficient of variation)

ns و ** به ترتیب بیانگر نبود اثر معنی‌دار و آثار معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and ** indicate non-significant effect and significant effects at the 5 and 1% levels, respectively.

جدول ۴. دامنه تغییرات و میانگین صفات مختلف در ژنوتیپ‌های گلرنگ در دو محیط بدون تنش و تنش خشکی

Table 4. Range of variation and mean of different traits in safflower populations across two environments of non-stress and drought stress conditions.

صفات	میانگین						کمینه	
	پیشینه						بدون تنش	تنش
	Max							
Traits	Mean						بدون تنش	تنش
	درصد تغییر میانگین در اثر تنش		Stress		Normal			
روز تا تکمه‌دهی (days)	-0.71 ^{ns}	167.09 ^a	168.30 ^a	175	175	153	156	
Days to budding								
روز تا گل‌دهی (days)	-1.95 [*]	177.27 ^b	180.75 ^a	185	185	174	175	
Days to flowering								
روز تا رسیدگی (days)	-3.70 [*]	211.77 ^b	219.91 ^a	219	228	207	208	
Days to maturity								
ارتفاع بوته (cm)	-11.68 [*]	93.73 ^b	106.13 ^a	117.2	137	76	85.80	
Plant height								
قطر غوزه (mm)	-4.40 [*]	26.24 ^a	27.45 ^a	31.33	55.15	20.40	20.65	
Capitulum diameter								
تعداد انشعاب در بوته	-12.31 [*]	6.55 ^a	7.47 ^a	18	11.50	4.10	4.50	
Number of branches per plant								
محتوای نسبی آب برگ (/)	-25.38 [*]	59.35 ^b	79.54 ^a	90	96.97	31.22	35.27	
Relative water content of leaf								
عملکرد دانه (g plant ⁻¹)	-27.68 [*]	12.17 ^b	16.83 ^a	23.52	24.44	5.34	8.57	
Grain yield								
وزن هزار دانه (g)	-2.13 ^{ns}	38.58 ^a	39.42 ^a	55.26	55.44	20.70	24.08	
Thousand-grain weight								

ns و * به ترتیب بیانگر نبود معنی‌داری و معنی‌داری در سطح ۵ درصد است. علامت منفی در ستون درصد تغییر، نشان‌دهنده کاهش صفت در اثر تنش خشکی است. برای هر صفت، تفاوت دو میانگین با حرف مشترک در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

ns and *, respectively, indicate non-significance and significance at the 5% level. A negative sign in the percentage change column represents a decrease in the trait due to drought stress. For each trait, the difference between two means with a common letter is not significant at the 5% level.

جدول ۵. ضرایب تنوع فنوتیپی، ژنتیکی و وراثت‌پذیری عمومی صفات مختلف در ژنوتیپ‌های گل‌رنگ در دو محیط بدون تنش و تنش خشکی
Table 5. Coefficients of phenotypic and genetic variation, and broad-sense heritability of different traits in safflower populations across two environments of non-stress and drought stress conditions.

صفات Traits	ضریب تغییرات فنوتیپی (%) Phenotypic coefficient of variation		ضریب تغییرات ژنتیکی (%) Genotypic coefficient of variation		وراثت‌پذیری عمومی (%) Broad-sense heritability	
	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش
Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress
روز تا تکمه‌دهی (days) Days to budding	1.94	2.06	1.62	1.76	69.83	73.33
روز تا گل‌دهی (days) Days to flowering	1.14	0.73	0.91	0.26	64.21	12.79
روز تا رسیدگی (days) Days to maturity	1.07	0.81	0.73	0.19	46.42	25.93
ارتفاع بوته (cm) Plant height	5.47	5.14	4.45	4.03	65.94	61.35
قطر غوزه (mm) Capitulum diameter	7.81	3.84	6.42	1.76	67.48	34.27
تعداد انشعاب در بوته Number of branches per plant	9.68	11.98	1.01	7.13	18.27	35.46
محتوای نسبی آب برگ (%) Relative water content of leaf (g plant ⁻¹)	10.11	11.31	3.31	6.06	19.69	28.69
عملکرد دانه (g plant ⁻¹) Grain yield	13.04	14.28	6.90	9.03	27.95	39.92
وزن هزار دانه (g) Thousand-grain weight	10.41	10.02	8.82	8.36	71.81	69.60

گیاهان، انتخاب برای یک صفت به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر صفات دیگر اثر می‌گذارد؛ بنابراین برنامه‌ریزی صحیح در فرآیند انتخاب و توجه به همبستگی بین صفات اهمیت دارد (Ebrahimi et al., 2016). با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۶ مشاهده می‌شود که در شرایط بدون تنش خشکی (پایین قطر جدول) صفاتی مانند روز تا تکمه‌دهی با ارتفاع و تعداد انشعاب در بوته دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری است. همچنین صفت روز تا گل‌دهی با روز تا رسیدگی و تعداد انشعاب و همین‌طور صفت روز تا رسیدگی با تعداد انشعاب همبستگی مثبت و معنی‌داری داشتند. در کل صفات فنولوژیک با تعداد انشعاب در ارتباط مثبت و معنی‌داری قرار گرفتند. این یافته بیانگر آن است که هرچه دوره رشدی گیاه طولانی‌تر باشد، امکان انجام فتوسنتز و ذخیره مواد غذایی افزایش یافته و در نهایت از راه افزایش انشعابات، موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود. در پژوهش دیگری همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تعداد روز تا گل‌دهی با تعداد روز تا رسیدگی در گل‌رنگ گزارش شد (Majidi et al., 2024). ارتفاع بوته با صفات روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی در هر دو شرایط رطوبتی همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد (جدول ۶) که این نتایج با یافته‌های Sabaghnia et al. (2024) هم‌خوانی دارد. در شرایط بدون تنش، صفت عملکرد دانه با صفت وزن هزار دانه همبستگی نسبتاً قوی و معنی‌داری در سطح پنج درصد به صورت مستقیم نشان داد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، با توجه به این‌که اکثر صفات اندازه‌گیری شده دارای روابط گوناگون با هم هستند و این صفات تحت تأثیر شرایط محیطی و ژنوتیپ‌های مورد بررسی قرار می‌گیرند، در شرایط تنش و بدون تنش نیز همبستگی بین صفات متفاوت است. از طرفی بیان ژن‌ها در شرایط بدون تنش و تنش متفاوت است که بر همبستگی بین صفات اثر می‌گذارد (Espanani et al., 2023).

نتایج مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها برای صفت روز تا گل‌دهی نشان داد که بیش‌ترین مقدار آن در محیط بدون تنش خشکی مربوط به ژنوتیپ G23 (پرتغال) و جمعیت‌های 40×86 و 32×71 با مقادیر به ترتیب ۱۸۵، ۱۸۵/۵ و ۱۸۲ روز بود. سریع‌ترین

گل‌دهی نیز در این محیط مربوط به جمعیت‌های 96×71، 9×40 و 74×67 با تعداد روز ۱۷۹، ۱۷۸ و ۱۷۶ بود. در محیط تنش خشکی، بیش‌ترین روز تا گل‌دهی برای جمعیت 9×86، ژنوتیپ G96 (ایران، کرمانشاه) و جمعیت 32×23 به ترتیب با ۱۸۰، ۱۷۹ و ۱۷۹/۵ روز ثبت شد. کوتاه‌ترین دوره گل‌دهی در این پژوهش مربوط به ژنوتیپ G54 (هند) و جمعیت‌های 32×86 و 74×86 به ترتیب با ۱۷۴/۵، ۱۷۵ و ۱۷۵/۵ روز تا گل‌دهی بود (جدول ۷). گل‌دهی یکی از صفات بسیار مهم در ارتباط با عملکرد دانه بوده و دستیابی به زودرسی و گل‌دهی سریع‌تر یکی از اهداف برنامه‌های اصلاحی گل‌رنگ است.

نتایج مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها برای صفت عملکرد دانه در بوته (جدول ۷) نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه در بوته در محیط بدون تنش برای ژنوتیپ G40 (تاجیکستان) از والد‌ها و جمعیت‌های 67×86 و 74×32 از تلاقی‌ها به ترتیب با مقادیر ۲۰/۷۰، ۲۲/۱۶ و ۲۱/۹۲ گرم در بوته حاصل شد. برای این صفت در محیط بدون تنش، ژنوتیپ G9 (اتریش) و جمعیت‌های 74×9 و 9×23 به ترتیب با مقادیر ۱۰/۷۲، ۱۳/۷۸ و ۱۱/۵۴ گرم در بوته دارای کم‌ترین عملکرد دانه بودند. همچنین در شرایط تنش خشکی، بیش‌ترین میزان عملکرد دانه در بوته مربوط به ژنوتیپ G54 (هند) و جمعیت‌های 9×40 و 96×54 به ترتیب با مقادیر ۱۱/۵۴، ۱۵/۰۲ و ۱۴/۷۷ گرم در بوته بود. در شرایط تنش خشکی نیز، ژنوتیپ G23 (پرتغال) و جمعیت‌های 67×32 و 96×23 با مقادیر ۶/۷۸، ۷/۶۷ و ۴/۸۸ گرم در بوته، کم‌ترین میزان عملکرد دانه در بوته نشان دادند. به‌طور کلی، میانگین عملکرد دانه در شرایط تنش به شدت کاهش یافت که با گزارش‌های پیشین هم‌خوانی دارد (Hussain et al., 2016; Shafiei-Koij et al., 2019). در مقابل، قطر غوزه و وزن هزار دانه کم‌ترین درصد کاهش میانگین تحت شرایط تنش را نشان دادند.

نتایج مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها برای شاخص تحمل تنش (CSI) نشان داد بیش‌ترین تحمل تنش در جمعیت‌های 67×71، 67×86 و ژنوتیپ G74 (اردن) و در رقم شاهد ژنوتیپ G51 با مقادیر به ترتیب ۴۸/۱۰، ۴۱/۵۹، ۳۹/۷۶ و ۵۱/۳۴ مشاهده شد

جدول ۶. همبستگی بین صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های گلرنگ زراعی در شرایط تنش خشکی (بالای قطر) و بدون تنش خشکی (پایین قطر)

Table 6. Correlation between traits studied in agronomic safflower genotypes under drought stress (above diagonal) and non-stress (below diagonal) conditions.

CSI	YSI	TGW	YPP	RWC	NP	NB	CD	PH	DM	DF	DB	صفت (Trait)
-0.25 *	-0.09 ns	-0.11 ns	-0.29 *	-0.11 ns	0.41 **	0.12 ns	-0.16 ns	0.13 ns	0.19 ns	0.12 ns	1	روز تا تک‌دهی Days to budding
-0.42 **	-0.08 ns	-0.37 **	-0.29 *	-0.07 ns	0.21 **	-0.01 ns	-0.05 ns	0.44 **	0.34 **	1	0.15 ns	روز تا گل‌دهی Days to flowering
-0.27 *	-0.20 ns	-0.01 ns	0.04 ns	0.22 ns	0.05 ns	-0.03 ns	0.22 ns	0.26 *	1	0.56 **	0.17 ns	روز تا رسیدگی Days to maturity
-0.27 *	-0.14 ns	-0.18 ns	-0.13 ns	0.31 ns	0.29 *	0.41 **	0.13 ns	1	0.58 **	0.66 **	0.23 **	ارتفاع بوته Plant height
0.05 ns	-0.07 ns	0.18 ns	-0.03 ns	0.18 ns	-0.37 **	-0.23 ns	1	0.01 ns	0.14 ns	0.06 ns	-0.20 *	قطر غوزه Capitulum diameter
-0.01 ns	-0.09 ns	-0.15 ns	0.15 ns	-0.13 ns	0.28 *	1	-0.10 ns	0.53 **	0.35 **	0.33 **	0.41 **	تعداد انشعاب در بوته Number of branches per plant
-0.30 *	-0.21 ns	-0.24 *	0.17 ns	-0.01 ns	1	0.01 ns	-0.21 ns	-0.13 ns	-0.02 ns	-0.15 ns	0.05 ns	تعداد غوزه Number of pods
0.02 ns	-0.09 ns	-0.06 ns	0.14 ns	1	-0.02 ns	-0.25 *	-0.24 *	-0.07 ns	-0.19 ns	-0.19 ns	-0.15 ns	محتوای نسبی آب برگ Relative water content of leaf
0.32 *	-0.35 *	0.30 *	1	0.14 ns	0.22 ns	0.21 ns	0.21 ns	0.08 ns	0.13 ns	-0.31 *	0.05 ns	عملکرد دانه Grain yield per plant
0.21 ns	0.01 ns	1	0.46 **	0.15 ns	-0.25 *	-0.04 ns	0.20 ns	-0.09 ns	0.08 ns	-0.30 *	0.11 ns	وزن هزار دانه Thousand-grain weight
0.33 **	1	-0.01 ns	-0.13 ns	-0.27 *	-0.11 ns	-0.22 ns	-0.07 ns	-0.30 *	-0.19 ns	-0.08 ns	-0.17 ns	شاخص پایداری YSI
1	0.33 **	0.16 ns	0.26 *	-0.05 ns	-0.05 ns	-0.17 ns	0.09 ns	-0.28 *	-0.10 ns	-0.19 ns	-0.24 *	شاخص تحمل CSI

روز تا تک‌دهی، DF = روز تا گل‌دهی، DM = روز تا رسیدگی، PH = ارتفاع بوته، HD = قطر غوزه، NB = تعداد انشعاب در بوته، NP = تعداد غوزه، RWC = محتوای نسبی آب برگ، عملکرد دانه تک‌بوته، YPP = عملکرد دانه تک‌بوته، YSI = شاخص پایداری عملکرد، CSI = شاخص ترکیبی تحمل

D = Days to budding, DF = Days to flowering, DM = Days to maturity, PH = Plant height, CD = Capitulum diameter, NB = Number of branches per plant, NP = Number of pods, RWC = Relative water content of leaf, YPP = Grain yield per plant, YSI = Yield stability index, YSI = Thousand-grain weight, YSI = Combined stress tolerance index

جدول ۷. میانگین صفات زراعی و مورفولوژیک در ۶۴ ژنوتیپ گلرنگ (۱۰ والد، ۴۵ جمعیت جدید و ۹ شاهد) در دو محیط بدون تنش و تنش خشکی

Table 7. The mean of agronomic and morphological traits for 64 safflower genotypes (10 parents, 45 new populations, and 9 checks) under two environments of non-stress and drought stress conditions

شاخص‌های تحمل تنش		وزن هزار دانه (g)		عملکرد دانه (g plant ⁻¹)		قطر غوزه (mm)		ارتفاع بوته (cm)		روز تا گل‌دهی			شماره ژنوتیپ	
Stress tolerance indices		Thousand-grain weight		Grain yield		Capitulum diameter		Plant height		Days to flowering				
CSI	YSI	Stress	بدون تنش	تنش	Normal	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	Normal	Genotype	Number
والدین (Parents)														
23.72	0.50	54.03	50.94	6.78	13.68	24.39	25.16	96.60	109.70	179.5	185	G23	1	
32.12	0.57	34.19	39.23	9.86	17.15	26.83	26.40	83.20	103.80	177.5	180	G32	2	
39.50	0.59	40.61	41.01	12.27	20.70	25.06	26.48	107.95	83.20	175.5	180.5	G40	3	
41.32	0.76	41.19	44.11	14.54	19.11	24.17	25.95	94.80	11.50	174.5	187.5	G54	4	
34.11	0.81	37.67	38	12.44	15.32	30.39	31.40	100.15	105.40	177	184.5	G67	5	
37.91	0.71	45.89	43.17	12.91	18.17	29.16	31.19	82	91.70	174.5	178.5	G71	6	
39.76	0.91	47.46	43.78	15.30	16.84	24.27	25.58	81.90	96	176	177.5	G74	7	
30.34	0.73	29.60	29.31	10.49	14.42	26.66	27.37	103.35	110.05	180	182.5	G86	8	
22.43	0.72	28.29	29.50	7.77	10.72	22.80	21.45	90.65	88.40	176.5	176.5	G9	9	
31.21	0.85	29.89	33.26	11.67	13.71	26.53	27.83	95.70	110.50	179	182.5	G96	10	
جمعیت‌های حاصل (Populations resulting from crossing)														
31.60	0.52	33.06	30.68	9.23	17.72	27.03	28.25	92.7	104	179.5	185	23×32	11	
33.99	0.62	41.14	46.81	10.83	17.46	26.78	26.67	96.25	111.8	177.5	180	40×32	12	
32.11	0.68	38.75	46.92	10.74	15.75	25.81	24.92	94.7	109.05	176.5	177	54×32	13	
37.34	0.62	39.92	43.42	11.84	19.22	27.93	30.67	100.7	107.95	175.5	182	71×32	14	
34.82	0.54	43.13	50.17	10.34	19.16	28.74	27.46	98.8	108.65	175	178	86×32	15	
32.07	0.53	37.98	41.02	9.43	17.86	26.66	26.29	89.5	121	177.5	185	23×40	16	

ادامه جدول ۷.

Table 7. (Continued)

شاخص های تحمل تنش		وزن هزار دانه (g)		عملکرد دانه (g plant ⁻¹)		قطر غوزه (mm)		ارتفاع بوته (cm)		روز تا گل دهی		کد ژنوتیپ	شماره ژنوتیپ
Stress tolerance indices		Thousand-grain weight		Grain yield		Capitulum diameter		Plant height		Days to flowering			
CSI	YSI	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Genotype	Number
والدین (Parents)													
32.52	0.67	42.71	35.91	10.81	16.04	26.90	27.84	95.35	117.55	177	185.5	86×40	17
31.43	0.64	35.94	39.15	10.20	15.89	25.88	28.01	95.55	118	178	185	23×54	18
29.20	0.42	39.93	44.50	7.64	18.24	25.24	24.73	90.75	105	179	178	40×54	19
32.28	0.58	41.92	42.90	9.97	17.13	26.22	26.78	83.25	97.35	176	176	71×54	20
39.79	0.58	36.67	40.15	12.18	21.15	26.93	26.88	87.10	110.7	176	178.5	86×54	21
35.14	0.66	36.87	39.56	11.55	17.49	27.48	29.36	100.95	112.55	177	181.5	23×67	22
25.55	0.56	43.40	40.10	7.78	13.83	27.82	28.46	103.45	114.75	177	183	32×67	23
36.15	0.95	42.47	40.70	14.23	15.02	26.93	27.95	87.45	95	176	178.5	40×67	24
33.45	0.62	42.08	44.86	10.70	17.13	25.53	28.98	96.65	109.25	176.5	180	54×67	25
48.10	1.13	39.45	41.63	20.55	18.21	28.22	30.06	95.85	109.75	176	179	71×67	26
41.59	0.57	39.33	37.88	12.68	22.16	28.41	30.47	109.85	115.85	180.5	179	86×67	27
32.09	0.68	35.29	40.55	10.67	15.80	30.01	30.40	99.25	110.55	176.5	181	96×67	28
33.63	0.70	45.99	47.70	11.40	16.25	28.38	29.89	91	107.10	177.5	181.5	23×71	29
32.98	0.79	40.93	44.20	11.85	15.05	26.87	29.67	84.5	104.95	179.5	182.5	40×71	30
32.64	0.67	34.67	38.33	10.82	16.14	26.90	27.02	80.9	107.65	178.5	181.5	86×71	31
41.67	0.85	39.70	46.99	15.53	18.19	25.96	27.70	94.65	92.95	179	178	23×74	32
48.11	0.78	43.42	39.66	17.08	21.92	25.52	25.82	94.35	103.35	176.5	180	32×74	33
39.47	0.60	43.30	47.95	12.34	20.56	25.09	25.61	89.9	101.85	176	179	40×74	34
37.61	0.84	45.92	49.41	13.93	16.58	29.17	38.64	88.5	95.7	176	179	54×74	35

ادامه جدول ۷.

Table 7. (Continued)

شاخص‌های تحمل تنش		وزن هزار دانه (g)		عملکرد دانه (g plant ⁻¹)		قطر غوزه (mm)		ارتفاع بوته (cm)		روز تا گل‌دهی		کد ژنوتیپ	شماره ژنوتیپ
Stress tolerance indices		Thousand-grain weight		Grain yield		Capitulum diameter		Plant height		Days to flowering			
CSI	YSI	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	Genotype	Number
		Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal		
35.02	0.76	46.25	52.17	12.36	16.24	26.99	28.98	88	94.6	176.5	176	67×74	36
39.95	0.80	41.84	41.95	14.40	18.04	25.68	27.67	85.25	100.55	174.5	179.5	71×74	37
41.94	0.82	40.94	37.54	15.36	18.63	27.58	25.68	97.05	108.10	175.5	181.5	86×74	38
30.40	0.80	44.50	28.16	11.02	13.78	24.80	26.24	92	97.65	176	179	9×74	39
41.18	0.68	37.58	35.28	13.72	20.11	25.56	28.09	90.4	104.2	177.5	179.5	96×74	40
37.04	0.68	36.39	36.38	12.34	18.16	25.49	26.18	109.5	132.80	179.5	188	23×86	41
28.60	1.01	30.49	32.30	11.67	11.54	24.05	24.38	81.10	95.65	176.5	178.5	23×9	42
30.53	0.69	41.35	33.37	10.26	14.92	24.04	26.25	90.75	100.40	175	178.5	32×9	43
37.56	0.98	46.41	37.53	15.02	15.34	27.58	23.95	90.25	97.25	176.5	178	40×9	44
40.20	0.78	38.19	37.59	14.34	18.36	26.50	24.35	84.40	101.15	175	180	54×9	45
35.17	0.52	41.07	37.86	10.28	19.64	24.50	26.47	95.35	107.70	176.5	181.5	67×9	46
31.40	1.09	33.32	34.56	13.26	12.21	26.30	40.84	87.35	102.10	176.5	181	71×9	47
35.33	0.70	31.25	37.14	11.94	17.10	24.45	25.26	97.90	100.50	180	178	86×9	48
41.36	0.68	29	34.99	13.71	20.30	25.33	25.60	96.30	101.15	176.5	179.5	96×9	49
26.48	0.51	34.98	36.45	7.67	15.04	26.52	24.77	99.05	107.35	179	186	23×96	50
35.85	0.62	31.01	34.55	11.41	18.41	24.79	27.22	101.75	106.20	177	180	32×96	51
31.20	0.59	34.46	33.47	9.7	16.46	26.71	27.09	100.5	115.50	180	188	40×96	52
44.06	0.69	40.76	37.77	14.77	21.33	25.73	28.24	97.35	106.80	176.5	178	54×96	53
35.68	0.68	37.85	43.20	11.86	17.55	26.55	27.26	82.75	98	176.5	179	71×96	54
31.53	0.48	34.78	38.09	8.84	18.40	26.97	27.01	102.45	107.40	177.5	180	86×96	55

ادامه جدول ۷.

Table 7. (Continued)

شاخص‌های تحمل تنش Stress tolerance indices	YSI	وزن هزار دانه (g) Thousand-grain weight		عملکرد دانه (g plant ⁻¹) Grain yield		قطر غوزه (mm) Capitulum diameter		ارتفاع بوته (cm) Plant height		روز تا گل‌دهی Days to flowering		شماره ژنوتیپ Number
		تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	تنش	بدون تنش	
CSI		Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Stress	Normal	Genotype
ارقام شاهد (control)												
26.45	1.03	529.05	545.43	10.58	10.91	26.51	26.62	91.85	117.25	178	185.5	G20
43.22	0.88	930.68	815.55	18.61	16.31	23.44	24.75	90.75	100.80	175.5	179	G43
51.34	1.22	931.35	1140.93	18.63	22.82	24.64	26.16	90.25	102.25	176	177.5	G51
43.27	0.92	908.33	836.80	18.17	16.74	27.54	28.76	103.25	113.25	180	179.5	G52
28.98	0.76	672.23	513.83	13.44	10.28	25.47	27.13	104.35	111.20	178	184	G58
31.83	1.28	815.95	586.23	11.40	14.59	21.06	22.71	96.05	106.25	180.5	184.5	G59
37.41	1.00	669.77	419.77	15.10	15.14	25.51	26.78	96.85	111.90	178.5	181.5	G65
34.18	0.72	815.95	586.23	16.32	11.72	95.35	108.10	95.35	108.10	179	180	G93
26.13	0.63	669.77	419.77	13.40	8.40	26.03	27.95	99.30	109.25	180	185	G94
0.22	4.22	324.43	321.15	6.48	6.42	3.34	6.69	10.48	10.90	4.22	4.40	LSD (5%)

در بای پلات ترسیمی از محیط تنش خشکی (شکل ۱)، مؤلفه اول با صفات فنولوژیک همچون روز تا تکمه‌دهی، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی و همچنین تعداد غوزه، تعداد انشعاب و ارتفاع بوته همبستگی مثبت و قوی نشان داد. از طرف دیگر، مؤلفه دوم با صفت مهمی مانند عملکرد همبستگی مثبت نشان داد. در مجموع با توجه به بای پلات ترسیمی در محیط تنش خشکی، می‌توان این نتیجه را استنباط کرد که ژنوتیپ‌هایی که در ناحیه پایین سمت چپ واقع شده‌اند، به تنش خشکی متحمل‌ترند. بر این اساس ژنوتیپ‌هایی همچون والد G32 (سودان) و جمعیت‌های 54×71، 9×23، 9×32، و 32×86 از نظر تحمل تنش، مطلوب بوده و در یک گروه قرار می‌گیرند. جمعیت‌های دارای والد‌های G9 (اتریش)، G71 (مکزیک) و G32 (سودان) پتانسیل خوبی برای تحمل تنش خشکی نشان دادند.

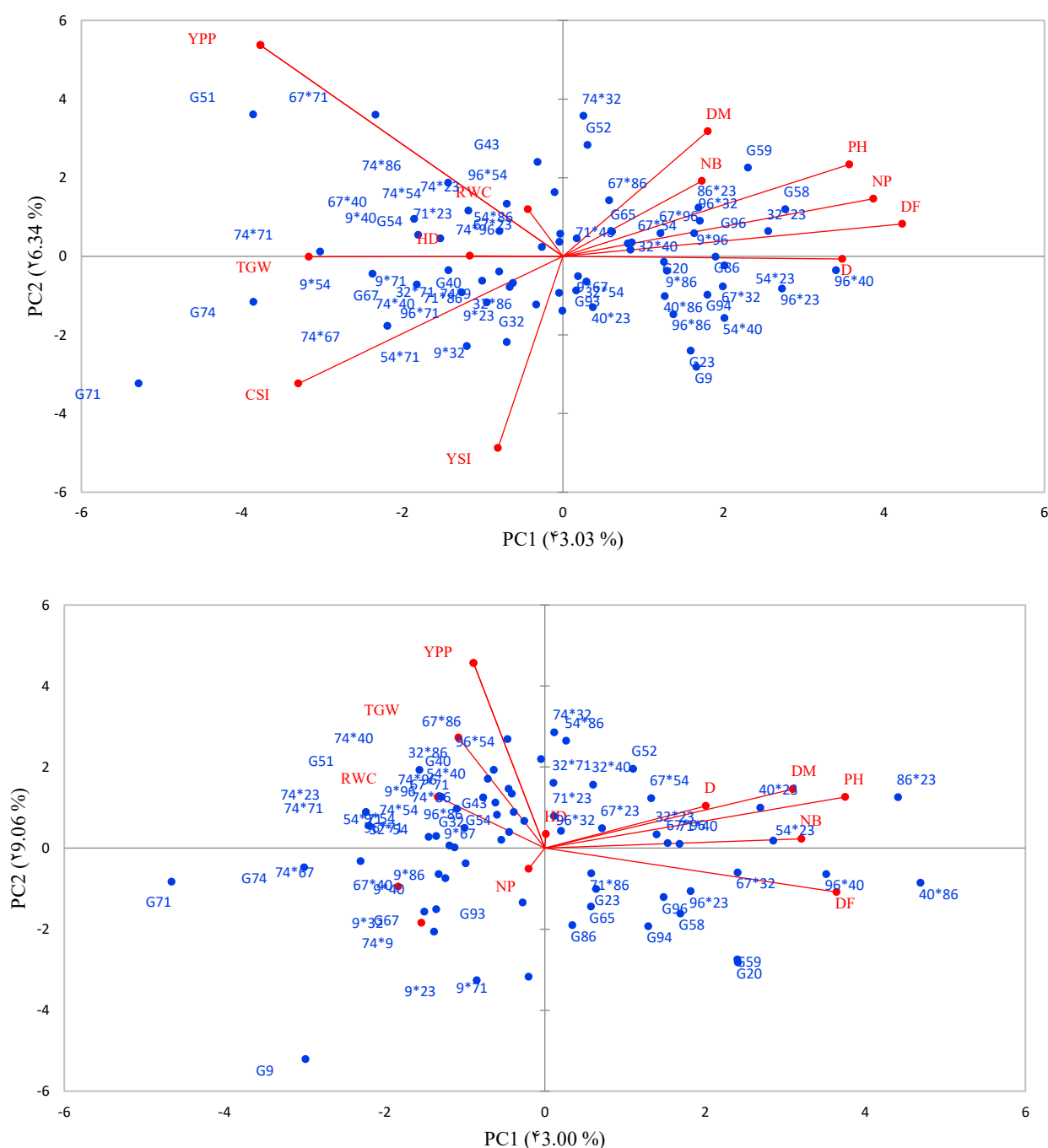
به منظور ارزیابی دقیق‌تر روابط بین شاخص‌ها و بررسی هم‌زمان آن‌ها، تجزیه مؤلفه اصلی شاخص‌ها و عملکرد دانه در دو شرایط رطوبتی انجام شد (شکل ۲). با توجه به شکل ۲ که نشان‌دهنده میزان تحمل ژنوتیپ‌ها نسبت به تنش خشکی در برابر پایداری عملکرد دانه آن‌ها است، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جمعیت 74×67 و والد G71 (مکزیک)، دارای بیش‌ترین تحمل تنش خشکی و همچنین پایداری عملکرد دانه زیاد در شرایط تنش خشکی هستند. همچنین والد G71، که به‌تنهایی دارای شاخص تحمل تنش زیادی بود، حضور آن در اکثر تلاقی‌ها باعث افزایش پایداری عملکرد دانه و افزایش شاخص تحمل تنش آن تلاقی شد. همچنین نتایج نشان داد که جمعیت‌های 40×86، 96×71، 9×23، 9×32، 96×86، 9×54، 74×40 و والد‌های G67 (لیبی) و G74 (اردن) از نظر پایداری عملکرد و شاخص‌های تحمل در یک گروه قرار می‌گیرند که نشان از تنوع در ژرم پلاسما موجود و امکان انتقال این ویژگی به سایر ارقام سازگار است.

نتیجه‌گیری

با توجه به وجود تنش‌های خشکی ایران که منجر به تغییرات مورفولوژیک، فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی و کاهش

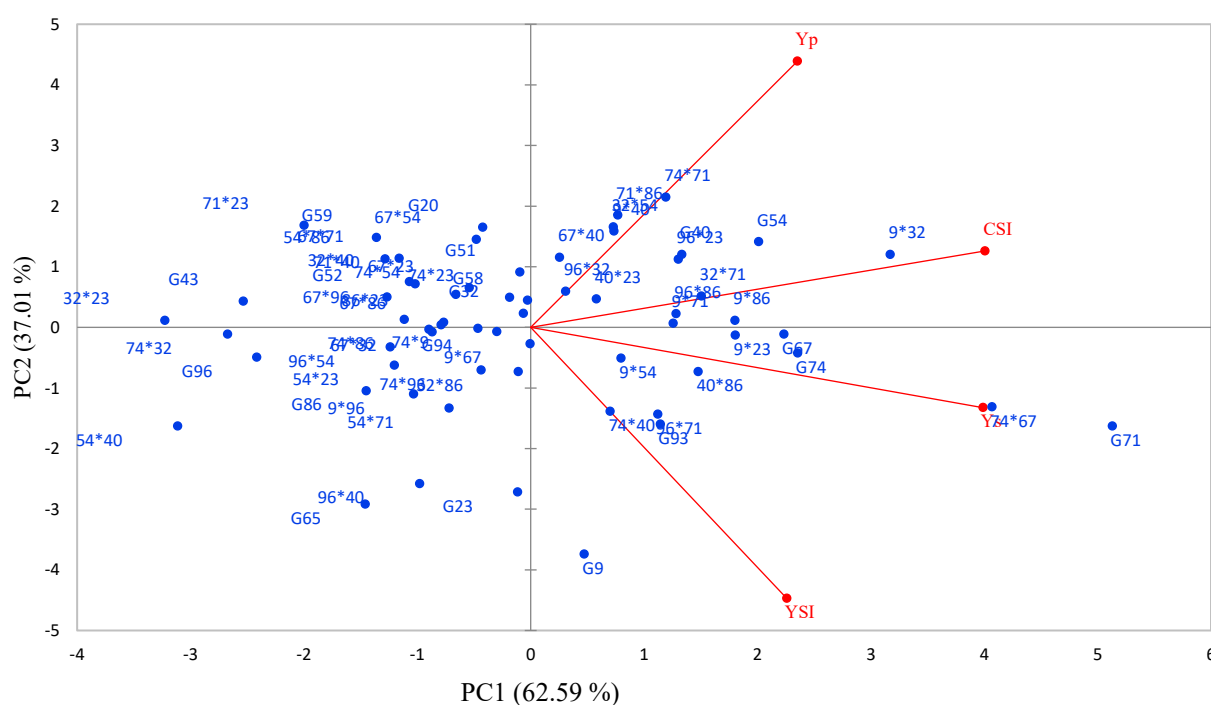
(جدول ۷). در مقابل کمترین میزان تحمل تنش خشکی را برای ژنوتیپ G9 (اتریش)، جمعیت‌های 67×32 و 96×23 به‌ترتیب با مقادیر ۲۲/۴۳، ۲۵/۵۵ و ۲۶/۴۸ در نظر گرفت که در واقع، این ژنوتیپ‌ها حساسیت زیادی در برابر تنش داشته‌اند. شاخص‌های تحمل، ابزاری مؤثر برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و انتخاب بهینه در هر دو شرایط بدون تنش و تنش هستند. شاخص جدید CSI، ترکیب خطی از چهار شاخص معنی‌دار بوده که استفاده از آن ساده‌تر است (Sabouri et al., 2022). نتایج مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها برای شاخص پایداری (YSI) نشان داد، ژنوتیپ G74 (اردن) و جمعیت‌های 9×71 و 67×71 به‌ترتیب با ۰/۹۱، ۰/۰۹ و ۱/۱۳، بیش‌ترین شاخص پایداری عملکرد و جمعیت‌های 96×23، 32×23 و 40×23 به‌ترتیب با ۰/۵۱، ۰/۵۲ و ۰/۵۳ کم‌ترین شاخص پایداری عملکرد را نشان دادند (جدول ۷). در پژوهش دیگری، شاخص‌های STI، MP و GMP دارای همبستگی مثبت و قوی با عملکرد دانه گل‌رنگ در شرایط تنش و بدون تنش بوده و به‌عنوان بهترین شاخص‌ها معرفی شدند (Malkinejad and Majidi, 2015).

با هدف بررسی هم‌زمان و درک بهتر روابط بین صفات در این پژوهش، از تجزیه بای پلات به‌منظور بررسی هم‌زمان کلیه صفات بررسی‌شده و شاخص‌های تحمل تنش و پایداری عملکرد به تفکیک هر محیط در ژنوتیپ‌های مختلف گل‌رنگ استفاده شد (شکل ۱). مؤلفه اول با صفات تعداد انشعاب، ارتفاع بوته، روز تا گل‌دهی و روز تا رسیدگی همبستگی قوی نشان داد. مؤلفه دوم نیز با صفاتی همچون محتوی نسبی آب برگ، وزن هزار دانه و عملکرد دانه، همبستگی زیادی نشان داد. بر این اساس در محیط بدون تنش، می‌توان اقدام به انتخاب ژنوتیپ‌های کارآمدتر و پر عملکرد نمود. به‌طوری‌که با توجه به شکل ۱، جمعیت‌های 54×23، 96×40، 86×23 و 40×86 به‌عنوان ژنوتیپ‌های با مؤلفه اول بالا و جمعیت‌های 54×40، 96×54، 67×86، 74×40 و 32×86 از تلاقی‌ها و G40 (تاجیکستان) از والد‌ها به‌عنوان ژنوتیپ‌های با مؤلفه دوم بالا شناسایی شدند. به‌طور کلی می‌توان گفت تلاقی‌ها از نظر مؤلفه‌ی اول و دوم برتری نشان دادند.



شکل ۱. بای پلات مولفه‌های اصلی اول و دوم برای صفات مورفولوژیک و زراعی در ژنوتیپ‌های گیاه گلرنگ در شرایط بدون تنش (بالا) و تنش خشکی (پایین). (D = روز تا بودن، DF = روز تا گل‌دهی، DM = روز تا رسیدگی، PH = ارتفاع بوته، HD = قطر غوزه، NB = تعداد انشعاب در بوته، NP = تعداد غوزه، RWC = محتوای نسبی آب برگ، YPP = عملکرد دانه در بوته، TGW = وزن هزار دانه، CSI = شاخص ترکیبی تحمل تنش، YSI = شاخص پایداری عملکرد)

Fig. 1. Biplot of the first and second principal components for morphological and agronomic traits in safflower genotypes under non-stress (top) and drought stress (bottom) conditions. D = Days to budding, DF = Days to flowering, DM = Days to maturity, PH = Plant height, HD = Capitulum diameter, NB = Number of branches per plant, NP = Number of capitula (flower heads), RWC = Relative water content of leaf, YPP = Grain yield per square meter, TGW = Thousand-grain weight, CSI = Composite stress tolerance index, YSI = Yield stability index.



شکل ۲. بای پلات شاخص ترکیبی تحمل تنش (CSI)، شاخص پایداری عملکرد (YSI)، و عملکرد

در شرایط تنش خشکی (YS) و بدون تنش (YP) در ژنوتیپ‌های گیاه زراعی گلرنگ

Fig. 2. Biplot of the combined stress tolerance index (CSI), yield stability index (YSI), and yield under drought stress (YS) and non-stress (YP) conditions in agronomic safflower genotypes.

(مکزیک)، به عنوان متحمل‌ترین ژنوتیپ‌ها شناسایی شدند. والد G71 (مکزیک) نیز به دلیل تأثیر مثبت خود بر افزایش تحمل خشکی در تلاقی‌ها بسیار مؤثر بود. همچنین جمعیت‌های 86×40، 71×96، 23×9 و والدین دیگری مانند G67 (لیبی) و G74 (اردن) به عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب با عملکرد زیاد در هر دو شرایط رطوبتی معرفی شدند. این پژوهش بر نقش کلیدی نمونه‌های دیگر مراکز تنوع جهانی در افزایش تحمل خشکی و پایداری عملکرد گلرنگ به‌ویژه در مناطق کم‌آب ایران تأکید دارد. تک‌بوته‌های برتر از درون هر جمعیت جدید شناسایی شده و برای پژوهش‌های بعدی بذرگیری و انتخاب شدند. بررسی سازوکارهای زیستی و فیزیولوژیک تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های مقاوم گلرنگ از راه آنالیزهای بیوشیمیایی (متابولیت‌ها و پروتئین‌ها) و بررسی مولکولی و همچنین ارزیابی اثر تنش‌های محیطی بر عملکرد و کیفیت روغن از پیشنهاد‌های آینده این پژوهش است.

عملکرد در محصولات زراعی می‌شود، جایگزینی گونه‌ها و ارقام متحمل به خشکی با محصولاتی که نیاز به آب زیادی دارند، از اولویت‌های بخش کشاورزی است. تنش خشکی باعث کاهش عملکرد و صفات مرتبط با آن در این پژوهش شد. با این وجود نتایج ارزیابی ۶۴ ژنوتیپ شامل والدین، جمعیت‌های حاصل از تلاقی و ارقام شاهد نشان داد تنوع ژنتیکی زیادی برای صفات مختلف وجود دارد که امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و اصلاح صفات عملکردی این گیاه را در شرایط تنش فراهم می‌کند. نتایج نشان داد ترکیب ارقام داخلی و خارجی منجر به تنوع زیادی در جمعیت‌های حاصله گردید که نشان‌دهنده پتانسیل ژنتیکی جوامع جدید برای بهبود صفات مورد بررسی است. وراثت‌پذیری عمومی برای اغلب صفات مرتبط با عملکرد دانه در شرایط بدون تنش زیاد بود. با این وجود تنش خشکی بر میزان تنوع، وراثت‌پذیری و روابط برخی صفات تأثیر داشت. بر اساس شاخص‌های ترکیبی تحمل خشکی و پایداری عملکرد، جمعیت 67×74 و والد G71

تشکر و سپاسگزاری

تضاد منافع

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ گونه تضاد منافی با شخص، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است. شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

References

منابع مورد استفاده

- Ahmadzadeh, A. R., Alizadeh, B., Shahryar, H. A., Narimani, M., 2012. Path analysis of the relationships between grain yield and some morphological characters in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under normal irrigation and drought stress condition. J. Medi. Plant Res. 6, 1268–1271.
- Ashraf, M., 2010. Inducing drought tolerance in plants: Recent advances. Biotechnol. Adv. 12, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005>.
- Ebrahimi, F., Majidi, M. M., Arzani, A., Mohammad-Nejad, Gh., 2016. Oil and seed yield stability in a worldwide collection of safflower under arid environments of Iran. Euphytica 212, 131–144.
- Espanani, S., Majidi, M. M., Zadeh, M. K., Saeidi, G., 2023. Breeding safflower for adaptation to autumn sowing by interspecific hybridization. Agron. J. 115(4), 1599–1605.
- Golkar, P., Arzani, A., Rezaei, M., 2011. Determining relationships among seed yield, yield components and morpho-phenological traits using multivariate analysis in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Ann. Biol. Res. 2, 162–169.
- Guo, J., Ling, H., Wu, Q., Xu, L., Que, Y., 2014. The choice of reference genes for assessing gene expression in sugarcane under salinity and drought stresses. Int. J. Sci. Rep. 4, 12–25. <https://doi.org/10.1038/srep07042>.
- Haghpahan, M., Hashemipetroudi, S., Arzani, A., Araniti, F., 2024. Drought tolerance in plants: Physiological and molecular responses. Plants 13(21), 2962.
- Hazel, L. N., 1943. The genetic basis for constructing selection indexes. Genetics 28(6), 476–490.
- Henkrar, F., El-Haddoury, J., Ouabbou, H., Nsarellah, N., Iraqi, D., Bendaou, N., Udupa, S. M., 2016. Genetic diversity reduction in improved durum wheat cultivars of Morocco as revealed by microsatellite markers. J. Genet. Plant Breed. 73, 134–141. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0054>.
- Huang, L., Raats, D., Sela, H., Klymiuk, V., Lidzbarsky, G., Feng, L., Krugman, T., Fahima, T., 2016. Evolution and adaptation of wild emmer wheat populations to biotic and abiotic stresses. Annu. Rev. Phytopathol. 54, 279–301.
- Hussain, M. I., Lyra, D. A., Farooq, M., Nikoloudakis, N., Khalid, N., 2016. Salt and drought stresses in safflower: A review. Agron. Sustain. Develop. 36, 1–31.
- Joshan, Y., Sani, B., Jabari, H., Mozafari, H., Moaveni, P., 2020. The effect of late-season drought stress on some morphophysiological characteristics of Iranian safflower varieties in the Karaj region. Environ. Stresses Crop Sci. 13, 1093–1106.
- Kafi, M., Rostami, M., 2007. Effect of drought stress on yield, yield components, and oil percentage of safflower cultivars under saline irrigation conditions. Iran. J. Crop Res. 1, 121–132.
- Kakaei, M., Farshadfar, M., 2025. Studies on genetic parameters, heritability, and path analysis under irrigated and rainfed conditions in chickpea. Plant Mol. Biol. Rep. 25, 1–12.
- Kemal, A., Hailu, F., 2019. Genetic diversity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes at Wollo, Ethiopia using agro-morphological traits. Trop. Plant Res. 6, 157–165.
- Majidi, M. M., Pirnajmedin, F., Espanani, S., 2024. Wild introgression as an effective tool for aiding the expansion and adaptation of cultivated safflower. Agron. J. 116(6), 2776–2782.
- Malkinejad, R., Majidi, M. M., 2015. Evaluation of domestic and foreign cultivated safflower germplasms under normal and drought stress conditions. J. Crop Improv. Res. 7, 1–13.
- Malkinejad, R., Majidi, M. M., 2015. Screening for drought tolerance at the end of the season in domestic and foreign safflower germplasm based on sensitivity and tolerance indices. J. Crop Prod. Process. 15, 69–81.
- Mirabadi, A., Hagh Panah, M., Forozan, K., Talaei, S., 2018. Evaluating multivariate analysis of some quantitative traits in imported safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes in Sari location. J. Crop Breed. 10, 162–170.
- Mohammadi, M., Chaichi, M. R., Safikhani, S., 2018. Seed oil accumulation and yield of safflower affected by water supply and harvest time. Seed Oil Res. 29, 586–593.
- Mohammadi, M., Mirlohi, A., Majidi, M. M., Soleimani Kartalaei, E., 2021. Emmer wheat as a source for trait improvement in durum wheat: A study of general and specific combining ability. Euphytica 217, 64. <https://doi.org/10.1007/s10681-021-02796-x>.
- Mothashmiia, F., Tadayon, M. R., 2020. The response of yield and fatty acid composition in late planting of safflower genotypes under deficit irrigation regimes with ascorbic acid and jasmonic acid application. Environ. Stress. Crop Sci.

- 13, 455–469.
28. Mundel, H. H. 2007. Safflower (S. Poordad, Trans.). Sepehr Publications, Tehran.
29. Pirnajmedin, F., Jaškūnė, K., Majidi, M. M., 2024. Adaptive strategies to drought stress in grasses of the Poaceae family under climate change: physiological, genetic and molecular perspectives: A review. *Plant Physiol. Biochem.* 108814.
30. Sabaghnia, N., Ahadnezhad, A., Janmohammadi, M., 2024. Genetic diversity in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm for vegetative and agronomic characteristics in semi-arid regions. *Plant Genet. Resour.* 22(4), 241–250.
31. Sabouri, A., Dadras, A. R., Azari, M., Saberi Kouchesfahani, A., Taslimi, M. and Jalalifar, R., 2022. Screening of rice drought-tolerant lines by introducing a new composite selection index and competitive with multivariate methods. *Sci. Rep.* 12, 1–14.
32. Safavi, A., Pourdad, S., Taeb, M., Khosroshahli, M., 2010. Assessment of genetic variation among safflower (*Carthamus tinctorius* L.) accessions using agro-morphological traits and molecular markers. *J. Food Agric. Environ.* 8, 616–625.
33. Seyedsharifi, R., 2019. Effects of different irrigation levels, methanol application, and nano iron oxide on yield and grain filling components of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *J. Agric. Crop Prod.* 21, 27–42. <https://doi.org/10.22059/JCI.2018.264647.2079>.
34. Shafiei-Koij, F., Majidi, M. M., Mirlohi, A., Saeidi, G., Barthet, V. J., Eskini, S., 2019. The use of wild relatives of safflower to increase genetic diversity for fatty acid composition and drought tolerance. *Crop Sci.* 59(5), 2109–2118.
35. Smith, H. F., 1936. A discriminant function for plant selection. *Ann. Eugen.* 7(3), 240–250. <https://doi.org/10.2135/cropsci2019.01.0068>.
36. Zarei Soudani, H. A., 2021. Screening for Salt Stress Tolerance in Recombinant Inbred Lines (RILs) Derived from Interspecific Hybridization and Part of The Global Safflower Germplasm in Autumn Cultivation. Master's Thesis, Department of Plant Production and Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology.