



Original Article

Evaluation of the Diversity of Quantitative and Qualitative Characteristics of Some Cultivated Saffron (*Crocus sativus* L.) Ecotypes under the Climatic Conditions

Hamidreza Tavakkoli Kakhki¹ , Zohreh Nabipour^{2*} , Elaham Azarpajouh³ 

1- Faculty Member, Khorasan Razavi Agricultural Education and Natural Resources Research Center, Agricultural Education and Extension Research Organization, Mashhad, Iran.

2- Researcher of Gonabad Agricultural and Natural Resource and Education station, Agricultural and Natural Resources Research Center of Khorasan Razavi, AREEO, Gonabad, Iran.

3- Research Associate Professor, Technical and Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural Education and Natural Resources Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran.

*Corresponding author: zohreh.nabipour@yahoo.com

Received: 22 June 2026; **Revised:** 28 August 2026, **Accepted:** 29 September 2026

Extended Abstract

Introduction: Saffron (*Crocus sativus* L.) is one of the most valuable agricultural and medicinal products and holds a special position among industrial and export commodities of Iran. In addition to its use in the food industry, saffron has numerous applications in traditional and modern medicine, including cytoprotective, antioxidant, cardiovascular, respiratory, and digestive effects. Saffron production areas span a wide range of climatic conditions with considerable environmental variation, particularly in temperature. Unlike many crops, saffron has a unique thermal regime, and its growth activity typically begins with the onset of the cold season. Although saffron is generally well adapted to diverse environments, limited studies have examined the influence of cultivation management and production location on its qualitative traits. Establishing geographical indications for saffron quality especially regarding aroma, flavor, and color compounds (secondary metabolites) can provide significant commercial and economic advantages. Therefore, this research aims to support the commercialization of saffron production with an emphasis on quality.

Materials and Methods: Fourteen agronomic ecotypes were collected from Khorasan Razavi and South Khorasan provinces were evaluated using a randomized complete block design with three replications at the Gonabad Saffron and Medicinal Plants Research Station. Ecotypes were planted in late September 2018, and measurements began in the second year after planting. The evaluated traits included flower number, fresh flower weight, dry stigma weight per unit area, and the concentrations of crocin,



picrocrocin, and safranal. In addition, hierarchical cluster analysis (HCA) was performed to classify ecotypes based on quantitative flower traits and qualitative secondary metabolites, aiming to identify structural relationships among traits and ecotype groupings.

Results and Discussion: Analysis of variance revealed statistically significant differences among ecotypes for all quantitative and qualitative traits. In the first year, the highest stigma dry weight was observed in the Qain–Shahik ecotype, which was 82% higher than the lowest ecotype (Roshtkhar–Fathabad). In the second year, the highest stigma dry weight was obtained in the Gonabad–Saghi ecotype, which was not significantly different from Qain–Shahik. Comparison of flower number and fresh flower weight between these two ecotypes showed that although Gonabad–Saghi produced more flowers in the second year (266 vs. 235 flowers), its fresh flower weight was lower (76.46 vs. 81.76 g m⁻²). Similar to the first year, Roshtkhar–Fathabad exhibited the lowest stigma dry weight in the second year. Hierarchical cluster analysis of ecotypes based on mean stigma dry weight further demonstrated that ecotypes were separated into two distinct clusters. Ecotypes such as Qain–Hajiabad and Zaveh–Heshmatabad formed the closest pair, showing the smallest linkage distance and the highest similarity in stigma performance. Qain–Binabaj and Roshtkhar–Barakouh were also grouped at low distances, forming a stable core cluster of ecotypes with highly similar stigma yield. In contrast, ecotypes with lower performance were grouped at higher distances, indicating greater divergence in their stigma production profiles. This clustering pattern confirms the presence of meaningful genetic and phenotypic diversity among cultivated saffron ecotypes.

Conclusion: The findings of this study demonstrated substantial quantitative and qualitative diversity among the evaluated saffron ecotypes. Ecotypes such as Qain–Shahik and Gonabad–Saghi consistently exhibited superior stigma dry weight and flower production across both years, highlighting the presence of stable performance-related genetic variation. Conversely, ecotypes such as Roshtkhar–Fathabad showed consistently low values for key traits, indicating limited productive potential. Hierarchical cluster analysis of ecotypes based on mean stigma dry weight further clarified these differences by separating ecotypes into two distinct groups. Ecotypes including Qain–Hajiabad, Zaveh–Heshmatabad, Qain–Binabaj, and Roshtkhar–Barakouh formed a closely related cluster with minimal linkage distances, indicating highly similar stigma yield profiles and representing the core group of high-similarity ecotypes. In contrast, ecotypes with lower performance were grouped at greater distances, reflecting higher divergence in their stigma production characteristics. This clustering pattern confirms the presence of meaningful genetic and phenotypic diversity among cultivated saffron ecotypes and underscores the importance of selecting high-performing and genetically stable ecotypes for cultivation in different environments.

Conflict of Interest: The authors declare no potential conflict of interest related to the work.

Keywords: Clustering analysis, Functional traits, Genetic diversity, Saffron population, Secondary metabolites.



نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)

جلد چهاردهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۵

شماره صفحه: ۱۲۵-۱۱۰

doi 10.22077/jsr.2026.11559.1307

مقاله پژوهشی

ارزیابی تنوع خصوصیات کمی و کیفی برخی از اکوتیپ‌های زراعی زعفران (*Crocus sativus* L.) تحت شرایط اقلیمی خراسان رضوی و جنوبی

حمیدرضا توکلی کاخکی^۱، زهره نبی‌پور^{۲*}، الهام آذرپژوه^۳

- ۱- عضو هیات علمی، مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.
- ۲- محقق، ایستگاه تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گناباد، مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، گناباد، ایران.
- ۳- دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول: zohreh.nabipour@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۷

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی برخی از خصوصیات گل و کیفیت متابولیت‌های ثانویه تعدادی از اکوتیپ‌های زراعی زعفران تحت شرایط اقلیمی استان‌های خراسان رضوی و جنوبی انجام شد. بدین منظور تعداد چهارده اکوتیپ زراعی جمع‌آوری شده از دو استان خراسان رضوی و جنوبی در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات زعفران و گیاهان دارویی گناباد مورد بررسی قرار گرفتند. کاشت اکوتیپ‌های جمع‌آوری شده در اواخر شهریورماه سال ۱۳۹۷ انجام شد و سپس اندازه‌گیری‌ها از سال دوم پس از کاشت شروع شد. صفات مورد بررسی شامل تعداد گل، وزن تر گل و وزن خشک کلاله در متر مربع و همچنین اندازه‌گیری مقادیر کروسین، پیکروکروسین و سافرانال بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد متغیرهای کمی و کیفی مورد مطالعه از تفاوت آماری معنی‌داری برخوردار بودند؛ بطوریکه در سال اول بالاترین وزن خشک کلاله در متر مربع تحت اکوتیپ قاین - شاهیک (۱/۱۹ گرم بر متر مربع) مشاهده شد که نسبت به کمترین اکوتیپ (رشتخوار-فتح آباد با ۰/۲۱ گرم بر متر مربع) ۸۲ درصد بیشتر بود؛ در سال دوم نیز بیشترین وزن خشک کلاله در متر مربع تحت اکوتیپ گناباد - سقی (۱/۳۶ گرم بر مترمربع) حاصل شد که با اکوتیپ قاین - شاهیک تفاوت معنی‌داری نداشت. با توجه به نتایج دو سال، اکوتیپ قاین-شاهیک بعنوان اکوتیپ برتر از نظر عملکرد خشک کلاله معرفی می‌شود. نتایج تحلیل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نشان داد که اکوتیپ‌های زعفران بر اساس میانگین وزن خشک کلاله در دو خوشه مستقل قرار می‌گیرند؛ به‌طوری‌که اکوتیپ‌های قاین-حاجی‌آباد، زاوه-حشمت‌آباد، قاین-بیناباج و رشتخوار-برکوه در کمترین فاصله ادغام شده و خوشه پایدار و همگنی را تشکیل می‌دهند. الگوی همبستگی بین صفات عملکردی و کیفی نیز این ساختار را پشتیبانی می‌کند و بیانگر آن است که تفاوت‌های عملکردی میان اکوتیپ‌ها ناشی از تنوع ژنتیکی قابل توجه در جمعیت زعفران است. این تنوع می‌تواند به‌عنوان منبعی ارزشمند برای برنامه‌های به‌نژادی و بهبود عملکرد مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خوشه بندی، تنوع ژنتیکی، توده زعفران، صفات عملکردی، متابولیت‌های ثانویه.



Copyright © 2026 by the authors
Published by University of Birjand. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقدمه

عملکرد و کیفیت ادعا می‌شود متفاوتند. تحقیقات علمی نیز این امر را تا حدی تأیید کرده‌اند؛ بابایی و همکاران (Babaei et al., 2014) با استفاده از نشانگرهای مولکولی SRAP تنوع ژنتیکی اندک ولی قابل اندازه‌گیری بین نمونه‌های زعفران مناطق مختلف ایران گزارش کردند. همچنین علوی سینی و همکاران (Alavi Siney et al., 2023) با به‌کارگیری نشانگرهای ISSR به وجود ساختار جمعیتی ضعیفی در اکوتیپ‌های محلی زعفران ایران پی بردند که بیانگر تفاوت ژنتیکی اندکی بین مناطق مختلف است. از نظر ویژگی‌های مرفولوژیکی و شیمیایی، یافته‌های جدید حاکی از وجود تنوع معنی‌دار میان اکوتیپ‌ها حتی در شرایط کشت یکسان است. در همین راستا مطالعه‌ای در دانشگاه تهران بر روی تعداد ۲۲ اکوتیپ زعفران ایرانی نشان داد که بین این اکوتیپ‌ها از لحاظ همه صفات اندازه‌گیری شده شامل صفات زراعی مانند تعداد و وزن گل و عملکرد کلالة خشک و نیز میزان متابولیت‌های ثانویه کروسین، پیکروکروسین و سافرانال تفاوت آماری معنی‌داری وجود داشت (Hossein-zadeh et al., 2025). در این تحقیق اکوتیپ قائنات از نظر بسیاری از صفات زراعی (مانند تعداد گل و عملکرد کلالة در واحد سطح) برتر از سایرین بود، در حالی که اکوتیپ تربت حیدریه میزان ماده موثره سافرانال بیشتری در مقایسه با دیگر اکوتیپ‌ها داشت. همچنین ضرایب همبستگی درون‌اکوتیپی نشان داد محتوای کروسین و پیکروکروسین همبستگی مثبت و قوی با یکدیگر داشت (هر دو بیانگر قدرت رنگ و طعم)، اما سافرانال (عطر) با آن‌ها همبستگی معنی‌داری نداشت (Hossein-zadeh et al., 2025). همچنین نتایج آزمایش دیگری تأیید می‌کند که علی‌رغم پایه ژنتیکی محدود، تنوع فنوتیپی سودمندی در جمعیت‌های زعفران وجود دارد که می‌تواند برای بهبود عملکرد و کیفیت مورد بهره‌برداری قرار گیرد؛ به بیان دیگر هرچند نشانگرهای مولکولی توان تفکیک اکوتیپ‌ها را ندارند، ولی تفاوت در صفات کمی و کیفی از قبیل طول و وزن کلالة، تعداد گل، زمان گلدهی و میزان متابولیت‌ها بین زعفران مناطق مختلف مشاهده می‌شود (Siracusa et al., 2013). همچنین کاردون و همکاران (Cardone et al., 2021) در مطالعه چهار اکوتیپ زعفران از ایتالیا، اسپانیا و یونان دریافتند که ظهور گل در اکوتیپ ساردنی ایتالیا در مقایسه با سه اکوتیپ دیگر

زعفران با نام علمی *Crocus sativus* L. چندساله، پیازدار و بدون بذر (نرعیق و تریپلوئید) از تیره زنبق است (Hossein-zadeh et al., 2025). این گیاه کوتاه و علفی در پاییز گل‌های بنفش با کلالة‌های قرمز تولید می‌کند که پس از خشک‌شدن به‌عنوان ادویه گران‌بهای زعفران شناخته می‌شوند. زعفران سیکل رشد منحصربه‌فردی دارد؛ با آغاز خنکی پاییز جوانه زده، در پاییز گل می‌دهد و رشد رویشی آن طی زمستان و اوایل بهار ادامه یافته و در تابستان به خواب می‌رود (Molina et al., 2005). این ویژگی به زعفران امکان سازگاری به اقلیم‌های مختلف را داده است. زعفران نسبت به بسیاری از گیاهان زراعی به شرایط حرارتی متفاوتی مقاوم است و طیف دمایی نسبتاً گسترده‌ای را تحمل می‌کند (Kouzegaran et al., 2020). زعفران در فصل رکود تابستانه می‌تواند گرمای محدوده ۳۰-۳۵ درجه سانتی‌گراد و در زمستان سرمای حدود ۱۵- درجه سانتی‌گراد را تحمل کند (Kouzegaran et al., 2020). علیرغم اهمیت بالای زعفران، خاستگاه ژنتیکی و تنوع آن بسیار محدود است. زعفران گیاهی نرعیق است و تنها از طریق تقسیم بنه (پیاز) تکثیر می‌یابد؛ در نتیجه تنوع ژنتیکی محدودی در آن مشاهده شده است (Moraga et al., 2009; Hossein-zadeh et al., 2025). مطالعات مولکولی متعدد تأیید کرده‌اند که بین نمونه‌های مختلف زعفران اختلاف ژنتیکی زیادی وجود ندارد و از نظر ژنومی تقریباً تک‌شکلی (مونومورف) است. در همین راستا موراگا و همکاران (Moraga et al., 2009) با بررسی زعفران‌های نقاط مختلف جهان نشان دادند تنوع آللی بسیار کمی بین آن‌ها وجود دارد و همه به یک منشأ واحد برمی‌گردند؛ این موضوع باعث شده که زعفران در معرض فرسایش ژنتیکی قرار گیرد. از این رو حفاظت و شناسایی تنوع اکوتیپی محدود موجود در زعفران اهمیت زیادی دارد و انجام پروژه‌هایی نظیر ایجاد بانک ژن جهانی زعفران با هدف حفظ ذخایر ژنتیکی این گیاه ضروری است (Fernández et al., 2011). با وجود یکنواختی ژنتیکی، پژوهش‌ها نشان می‌دهد تفاوت‌های فنوتیپی قابل توجهی میان اکوتیپ‌های زعفران از مناطق مختلف وجود دارد. در ایران کشاورزان اصطلاحاً از توده‌های بومی (اکوتیپ‌ها) مانند زعفران قائنات، تربت حیدریه، گناباد، فردوس، استان فارس و غیره نام می‌برند که گاهی از نظر

زودتر اتفاق افتاد و همچنین در دو سال ارزیابی، عملکرد کلاله و کیفیت بالاتری از نظر میزان ترکیبات رنگ و عطر نسبت به اکوتیپ‌های کاشت‌شده در اسپانیا و یونان داشت؛ از طرف دیگر اکوتیپ آبروتزو ایتالیا بیشترین طول کلاله و وزن خشک کلاله و گل را تولید کرد، در حالی که اکوتیپ‌های اسپانیا و ساردنی ایتالیا از نظر بسیاری صفات مشابه بودند. از طرف دیگر در این تحقیق علیرغم وجود تفاوت‌های فنوتیپی، نشانگرهای مولکولی RAPD، SSR و SRAP نتوانستند اکوتیپ‌ها را از هم متمایز کنند که این موضوع نشان‌دهنده خاستگاه ژنتیکی مشترک آنها بود (Cardone et al., 2021). مجموعه این یافته‌ها بر اهمیت حفظ و ارزیابی تنوع اکوتیپی زعفران تأکید دارد، چرا که همین تفاوت‌های اندک می‌تواند در برنامه‌های به‌نژادی و گزینش توده‌های برتر برای شرایط اقلیمی مختلف به‌کار گرفته شود. آنچه که مسلم است بررسی و مطالعه تفاوت کمی و کیفی اکوتیپ‌های زراعی زعفران می‌تواند در جهت تهیه بانک اطلاعاتی مرتبط با ارتقاء و بهبود تولید و تجارت زعفران حائز اهمیت باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور جمع‌آوری بونه‌های زعفران، ابتدا مکان‌های مورد بررسی از دو استان خراسان رضوی و جنوبی که به ترتیب در طی چند سال گذشته از بیشترین سطح زیر کشت و پایداری کاشت زعفران برخوردار بودند، انتخاب شد (سالنامه‌های آماری کشاورزی ۱۳۹۲، ۱۳۹۳، ۱۳۹۴). برخی از ویژگی‌های جغرافیایی هر یک از اکوتیپ‌های انتخابی زعفران در **جدول ۱** ارائه شده است. در این خصوص ابتدا اطلاعات زراعی هر یک از مناطق مورد مطالعه شامل تناوب زمین، تاریخ کاشت، سابقه کاشت، نحوه کاشت، تاریخ گل‌دهی، تعداد مدارهای آبیاری، فواصل آبیاری، تاریخ اولین و آخرین آبیاری با تنظیم پرسشنامه و مصاحبه حضوری با کشاورزان جمع‌آوری شد. سپس بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده، نمونه برداری از قدیمی‌ترین قطعه کاشت زعفران هر یک از مناطق که جابجایی بونه زعفران در زمان کاشت از یک منطقه به منطقه دیگر در آن صورت نپذیرفته بود، انجام شد. در ادامه کاشت بونه‌های هر یک از اکوتیپ‌ها در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات زعفران و گیاهان دارویی گناباد در نیمه اول

مهر ماه سال ۱۳۹۷ انجام شد. ایستگاه تحقیقات کشاورزی گناباد در پنج کیلومتری شمال شرقی و در ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۳۱ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی گناباد واقع شده است. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۱۰۶۰ متر و میانگین بلند مدت بارندگی ۱۵۱ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر و حداقل درجه حرارت مطلق سالیانه به ترتیب ۴۴/۲ و ۱۴/۲- درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای فصل گرم ۲۳/۷ درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای فصل سرد ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط درجه حرارت ماهیانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در **جدول ۲** ارائه شده است. پس از نمونه‌برداری از خاک محل مورد آزمایش بر اساس نتایج بدست آمده مقدار ۴۰ تن در هکتار کود گاوی پوسیده فراوری شده هم‌زمان با آماده‌سازی اولیه در اوایل شهریورماه ۱۳۹۷ به زمین افزوده و سپس شخم اولیه انجام شد. همچنین بر اساس نتایج آزمون خاک قبل از کاشت مقادیر ۳۰ کیلوگرم در هکتار کودهای سوپر فسفات تریپل، ۳۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم و ۲۵ کیلوگرم در هکتار سولفات روی به زمین اضافه شد. در ادامه سایر عملیات آماده‌سازی ثانویه شامل دیسک و لولر طبق روش‌های رایج در مناطق کاشت زعفران انجام شد. برای هر کدام از اکوتیپ‌ها مقدار بونه مورد نیاز جهت کاشت هر خط با توجه به تراکم ۶۰ بونه در متر مربع تعیین گردید. میانگین وزن تک بونه بر اساس وزن‌گیری بونه‌ها قبل از کاشت ۷/۲ گرم بدست آمد. طول هر خط کاشت ۷ متر و فاصله بین دو خط متوالی ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین جهت سهولت تردد در بین تکرارها فاصله بین دو تکرار متوالی نیز ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. کاشت در دهه اول مهر ماه ۱۳۹۷ به‌صورت نیمه مکانیزه بوسله تراکتور تک خیش در عمق ۲۰-۱۸ سانتی‌متری خاک انجام شد. اولین آبیاری بصورت ثقلی در تاریخ ۱۵ مهر ماه صورت پذیرفت و پس از سپری شدن هفت روز سه‌شکنی خاک با استفاده از کارگر انجام شد. علاوه بر آبیاری نوبت اول با توجه به بارندگی تجمعی صورت گرفته سه نوبت آبیاری دیگر تا پایان فصل رشد انجام شد. همچنین جهت مبارزه با علف‌های هرز دو نوبت وجین توسط کارگر در پایان آذر و اسفند ماه انجام شد. با توجه به اینکه کاشت اکوتیپ‌ها در پاییز ۱۳۹۷ انجام شده بود

رسیدن رطوبت نمونه‌ها به ۱۰ الی ۱۲ درصد انجام شد. در پایان وزن خشک کلاله با استفاده از ترازوی حساس با دقت دو رقم اعشار اندازه‌گیری و ثبت شد. اندازه‌گیری متابولیت‌های ثانویه شامل کروسین، سافرانال و پیکروکروسین با استفاده از روش طیف‌سنجی نور فرابنفش منطبق با استاندارد ISO (۳۶۳۲-۲۰۱۰) در آزمایشگاه بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی انجام گردید. آنالیز و خوشه‌بندی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح پنج درصد و همبستگی بین صفات مورد بررسی به روش پیرسون اسپیرمن انجام شد.

و در واقع سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ اولین سال استقرار اکوتیپ‌ها در شرایط اقلیمی منطقه بود از این‌رو اندازه‌گیری صفات مورد نظر برای هر یک از اکوتیپ‌ها در دو سال زراعی (۹۹-۱۳۹۸ و ۴۰۰-۱۳۹۹) انجام شد. همزمان با شروع فصل ظهور گل در پایان آبان‌ماه کار جمع‌آوری گل‌ها برای کل سطح هر یک از اکوتیپ‌ها به مدت ۲۵ روز انجام شد. در هر نوبت برداشت پس از جمع‌آوری گل‌ها در ابتدا تعداد گل و وزن تر گل در سطح یک مترمربع اندازه‌گیری شد و در مرحله بعد جداسازی کلاله از گلبرگ‌ها در آزمایشگاه انجام گرفت. خشک کردن کلاله‌ها با استفاده از دستگاه خشک‌کن و در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ الی ۵ ساعت جهت

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های جغرافیایی مناطق انتخاب شده اکوتیپ‌های زعفران در دو استان خراسان رضوی و جنوبی
Table 1. Some geographical characteristics of selected areas of saffron ecotypes in the two provinces of Razavi and South Khorasan

ارتفاع از سطح دریا (متر) Height above sea level (m)	عرض جغرافیایی (درجه - دقیقه) Latitude (degrees-minutes)	طول جغرافیایی (درجه - دقیقه) Longitude (degrees-minutes)	منطقه Region	استان province
1487	34 10	58 39	گناباد-کاخک Gonabad-kakhk	رضوی Khorasan Razavi
1514	34 14	58 31	گناباد-سقی Gonabad-Saghi	
1472	34 16	58 29	گناباد-زبید Gonabad-Zibad	
1150	34 21	58 41	گناباد-شهر Gonabad-Shahr	
1193	35 00	59 38	رشتخوار-فتح‌آباد Roshtkhar-Fathabad	
1151	35 00	59 38	رشتخوار-براکوه Roshtkhar-Barakouh	
1306	35 17	59 36	زاوه-حشمت‌آباد Zaveh-Heshmatabad	
1763	33 19	59 20	بیرجند-مهموئی Birjand - Mahmoudi	جنوبی Khorasan Jonoubi
1914	41 32	59 30	بیرجند-مود Birjand - Moud	
1947	34 03	58 41	قاین-بیناباج Qaeen-Binabaj	
1143	33 42	59 57	قاین-حاجی‌آباد Qaeen-Hajiabad	
1473	33 42	59 11	قاین-شاهیک Qaeen-Shahik	
1514	34 09	58 14	فردوس-برون Ferdows-Boroun	
1532	34 05	58 17	فردوس-باغستان Ferdows- Baghestan	

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل کاشت اکوتیپ‌ها (ایستگاه گناباد)

Table 2. Physical and chemical properties of soil at the planting site of ecotypes (Gonabad station)

رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	نیترژن کل Total Nitrogen (%)	پتاسیم قابل استفاده Avialable Potasium (mg kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب Absorbable phosphorus (mg kg ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	ماده آلی Organic matter (%)	اسیدیته pH
16	22	62	1.9	0.028	121	7.49	0.27	0.46	7.9

نتایج و بحث

تعداد گل در متر مربع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، اکوتیپ و اثرات متقابل سال × اکوتیپ بر تعداد گل در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ قاین-شاهیک (۲۲۵ عدد) و گناباد - سقی (۲۰۹ عدد) دارای بیشترین تعداد گل در متر مربع بود و کمترین تعداد گل در اکوتیپ‌های گناباد - کاخک (۷۷ عدد) و رشتخوار-فتح آباد (۵۷ عدد) قابل مشاهده بود (جدول ۵). همچنین بررسی اثرات اصلی سال نشان داد تعداد گل در سال دوم بیشتر از سال اول بود (جدول ۴). جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد به ترتیب در سال اول و دوم اکوتیپ قاین- شاهیک (۲۱۶ عدد) و گناباد - سقی (۲۶۶ عدد) دارای بیشترین تعداد گل نسبت به سایر اکوتیپ‌ها بود (جدول ۶)؛ اما نکته اینجاست که پایداری تعداد گل در اکوتیپ قائن- شاهیک در مقایسه با اکوتیپ گناباد- سقی و نیز سایر اکوتیپ‌های مورد بررسی طی سال‌های آزمایش بیشتر بود، بطوریکه میزان افزایش تعداد گل همزمان با افزایش سن مزرعه به ترتیب در اکوتیپ‌های قائن-شاهیک و گناباد- سقی ۸ و ۷۴ درصد مشاهده شد؛ همچنین تعداد گل در واحد سطح تولیدی در این اکوتیپ طی هر دو سال آزمایش در گروه آماری بالا قرار گرفت بر این اساس می‌توان گفت تعداد گل در اکوتیپ قاین-شاهیک در هر دو سال بالا و دارای نوسان کم بوده است، بنابراین حساسیت کمتری به تغییر اقلیم داشته و از ثبات تولید بیشتری برخوردار است. مشابه اکوتیپ قاین-شاهیک می‌توان به اکوتیپ فردوس- برون هم اشاره کرد، بطوریکه بر اساس جدول ۶ همزمان با افزایش سن مزرعه فقط ۷ درصد تغییرات در این اکوتیپ مشاهده شد (۱۷۸ عدد در سال اول در مقایسه با ۱۹۱ عدد در سال دوم). همچنین جدول ۶ نشان داد

اکوتیپ‌های بومی گناباد دارای تعداد گل کم یا دارای نوسانات بالای تعداد گل همزمان با افزایش سن مزرعه بود.

وزن تر گل در متر مربع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اکوتیپ در سطح یک درصد بر وزن تر گل معنی‌دار بود، در حالیکه اثر سال و اثرات متقابل سال × اکوتیپ معنی‌دار نبود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ قاین-شاهیک (۸۰/۶۱ گرم در متر مربع) دارای بیشترین وزن تر گل در متر مربع بود و سپس اکوتیپ‌های فردوس- برون و گناباد - سقی دارای وزن تر گل در متر مربع بیشتری بودند، همچنین کمترین وزن تر گل در متر مربع در اکوتیپ رشتخوار-فتح آباد (۲۰/۸۶ گرم در متر مربع) قابل مشاهده بود (جدول ۵). عدم معنی‌داری اثر اصلی سال و اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان دهنده این است که وزن تر گل در اکوتیپ‌های مختلف طی هر دو سال مورد بررسی رفتار مشابه داشته، بنابراین پایداری این صفت در مقایسه با تعداد گل در متر مربع همزمان با افزایش سن مزرعه بیشتر بوده است.

وزن خشک کلاله در متر مربع

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، اکوتیپ و اثرات متقابل سال × اکوتیپ بر تعداد گل در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ قاین-شاهیک (۱/۲۶ گرم در مترمربع) دارای بیشترین وزن خشک کلاله در متر مربع بود و کمترین مقدار آن در اکوتیپ رشتخوار-فتح آباد (۰/۴۷ گرم در متر مربع) قابل مشاهده بود (جدول ۵). نتایج جدول ۵ نشان داد تفاوت در اکوتیپ‌ها باعث تفاوت حداکثر ۶۲ درصد بین اکوتیپ‌های مختلف شد. اثرات

اصلی سال نیز نشان داد وزن خشک کلالة در واحد سطح در سال دوم بیشتر از سال اول بود (جدول ۴). جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد همه اکوتیپ‌ها در سال دوم در مقایسه با سال اول وزن خشک کلالة بیشتری داشت، بطوریکه بیشترین مقدار این صفت در سال دوم و اکوتیپ گناباد - سقی (۱/۳۶ گرم در متر مربع) بدون اختلاف معنی‌دار با اکوتیپ قاین - شاهیک (۱/۳۲ گرم در مترمربع) مشاهده شد، همچنین در سال اول بیشترین وزن خشک کلالة در اکوتیپ قاین - شاهیک قابل مشاهده بود (جدول ۶). بر اساس جدول ۶ پایدارترین وزن خشک کلالة همزمان با افزایش سن مزرعه در اکوتیپ قاین - شاهیک مشاهده شد (۱۰ درصد تغییر)، در حالی‌که بیشترین تغییرات در وزن خشک کلالة همزمان با افزایش سن مزرعه تحت اکوتیپ گناباد - سقی مشاهده گردید (از ۰/۷۳ گرم در متر مربع در سال اول به ۱/۳۶ گرم در متر مربع در سال دوم). این موضوع نشان دهنده تاثیر بالای وزن خشک کلالة در این اکوتیپ از تغییرات اقلیمی می‌باشد.

پیکروکروسین (جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، اکوتیپ و اثرات متقابل سال × اکوتیپ بر مقدار پیکروکروسین در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ قاین-شاهیک (۸۸/۱۷ جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر) دارای بیشترین مقدار پیکروکروسین بود و کمترین مقدار آن در اکوتیپ قاین-حاجی‌آباد (۶۷/۷۴ جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر) قابل مشاهده بود (جدول ۵). نتایج جدول ۵ نشان داد مقدار پیکروکروسین در سال دوم نسبت به سال اول بیشتر بود (جدول ۴).

جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد مشابه با مقدار کروسین، اکوتیپ قائن-شاهیک دارای بیشترین مقدار پیکروکروسین هم بود. در هر دو ماده مؤثره کروسین و پیکروکروسین پایدارترین اکوتیپ‌ها همزمان با افزایش عمر مزرعه شامل قاین-شاهیک و سپس گناباد-کاخک بود و از طرف دیگر اکوتیپ فردوس-باغستان دارای بیشترین تغییرات عددی بود.

سافرانال (جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، اکوتیپ و اثرات متقابل سال × اکوتیپ بر مقدار سافرانال در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ فردوس-باغستان (۳۷/۷۴ جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر) دارای بیشترین مقدار سافرانال بود که البته با اکوتیپ‌های گناباد-کاخک، قاین-بیناباج و رشتخوار-براکوه در گروه آماری مشترک قرار گرفتند از طرف دیگر اکوتیپ رشتخوار-فتح‌آباد دارای کمترین مقدار عددی (۲۸/۳۰ جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر) بود.

اصلی سال نیز نشان داد وزن خشک کلالة در واحد سطح در سال دوم بیشتر از سال اول بود (جدول ۴). جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد همه اکوتیپ‌ها در سال دوم در مقایسه با سال اول وزن خشک کلالة بیشتری داشت، بطوریکه بیشترین مقدار این صفت در سال دوم و اکوتیپ گناباد - سقی (۱/۳۶ گرم در متر مربع) بدون اختلاف معنی‌دار با اکوتیپ قاین - شاهیک (۱/۳۲ گرم در مترمربع) مشاهده شد، همچنین در سال اول بیشترین وزن خشک کلالة در اکوتیپ قاین - شاهیک قابل مشاهده بود (جدول ۶). بر اساس جدول ۶ پایدارترین وزن خشک کلالة همزمان با افزایش سن مزرعه در اکوتیپ قاین - شاهیک مشاهده شد (۱۰ درصد تغییر)، در حالی‌که بیشترین تغییرات در وزن خشک کلالة همزمان با افزایش سن مزرعه تحت اکوتیپ گناباد - سقی مشاهده گردید (از ۰/۷۳ گرم در متر مربع در سال اول به ۱/۳۶ گرم در متر مربع در سال دوم). این موضوع نشان دهنده تاثیر بالای وزن خشک کلالة در این اکوتیپ از تغییرات اقلیمی می‌باشد.

کروسین (جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال، اکوتیپ و اثرات متقابل سال × اکوتیپ بر مقدار کروسین در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی نشان داد اکوتیپ قاین-شاهیک (۲۵۸/۲ جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر) دارای بیشترین مقدار کروسین بود و کمترین مقدار آن در اکوتیپ رشتخوار-فتح‌آباد (۱۱۱/۸ جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر) قابل مشاهده بود (جدول ۵). نتایج جدول ۵ نشان داد تفاوت در اکوتیپ‌ها باعث تفاوت حداکثر ۶۲ درصد در کروسین گردید. اثرات اصلی سال نشان داد مقدار کروسین در سال اول بیشتر از سال دوم بود (جدول ۴).

جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد اکثر اکوتیپ‌ها در سال دوم در مقایسه با سال اول مقدار کروسین بیشتری داشت، به نظر می‌رسد تناقض موجود در اثرات متقابل سال × اکوتیپ و اثر اصلی سال ناشی از تغییرات شدید چند اکوتیپ خاص است بطور ویژه مقدار کروسین در اکوتیپ رشتخوار-براکوه و قاین-حاجی‌آباد همزمان با افزایش عمر مزرعه به ترتیب ۴۵ و ۵۳ درصد کاهش یافت. بنابراین می‌توان گفت سال دوم برای اکثر اکوتیپ‌ها بهتر بوده، اما تغییرات در چند

نتایج جدول اثرات اصلی نشان داد مقدار سافرانال در سال دوم نسبت به سال اول بیشتر بود (جدول ۴).

جدول اثرات متقابل سال × اکوتیپ نشان داد بیشترین مقدار سافرانال در اکوتیپ فردوس-باغستان تحت سال دوم دارای بیشترین مقدار عددی بود (۴۳/۴۱) جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر) که البته با اکوتیپ بیرجند - مود در سال دوم اختلاف معنی داری نداشت؛ ولی نکته اینجاست دو اکوتیپ مذکور در سال دوم نسبت به سال اول نوسان زیادی داشت (اکوتیپ فردوس-باغستان ۳۵ درصد افزایش و اکوتیپ بیرجند - مود ۶۱ درصد افزایش) (جدول ۶). بررسی روند تغییرات سافرانال همزمان با افزایش سن مزرعه در جدول ۶ نشان داد اکوتیپ‌های گناباد-کاخک و گناباد-شهر نسبت به سایر اکوتیپ‌ها دارای پایداری بیشتری بود و تغییرات عددی کمتری نسبت به سایر اکوتیپ‌ها داشت. در مجموع اثرات متقابل نشان داد بسیاری از اکوتیپ‌ها در سال دوم نوسانات قابل توجهی داشتند، بنابراین صفت مذکور نسبت به تغییرات محیطی بسیار حساس است (جدول ۶).

بررسی رابطه ضرایب همبستگی پیرسون

بررسی رابطه ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد صفات عملکرد گل شامل تعداد گل، وزن تر گل و وزن خشک کلاله کاملاً با همدیگر هم جهت هستند؛ بر این اساس می‌توان گفت اکوتیپ‌هایی که گل بیشتری تولید می‌کنند، وزن تر گل و وزن خشک کلاله بیشتری هم دارند (جدول ۷). همچنین بررسی همبستگی تعداد گل با کروسین (ضعیف، معنی دار)، پیکروکروسین (ضعیف، غیرمعنی دار) و سافرانال (خیلی ضعیف، غیر معنی دار) نشان داد تغییرات مواد موثره چندان تحت تاثیر تعداد گل نیست؛ از طرف دیگر همبستگی بین وزن خشک کلاله با کروسین، پیکروکروسین و سافرانال کاملاً معنی دار و مثبت بود، ولی مقادیر عددی چندان بالایی نداشت، بر این اساس ممکن است برخی از تغییرات مواد موثره مستقل از وزن خشک کلاله باشد (جدول ۷). وزن تر گل فقط با مقدار کروسین همبستگی مثبت داشت (جدول ۷).

بر اساس جدول ۷ بین مواد موثره اندازه‌گیری شده شامل کروسین، پیکروکروسین و سافرانال همبستگی بسیار مثبت و قوی وجود داشت؛ مقایسه میزان همبستگی

کروسین با پیکروکروسین (۰/۷۱) و سافرانال (۰/۴) نشان داد که رابطه همبستگی بسیار قوی‌ترین بین کروسین و پیکروکروسین در مقایسه با کروسین و سافرانال است، این موضوع می‌تواند تایید کننده نزدیکی بیشتر مسیر بیوشیمیایی تولید کروسین و پیکرو کروسین باشد (Hosseinzadeh et al., 2025)؛ از طرف دیگر رابطه همبستگی بین پیکروکروسین و سافرانال بسیار قوی است (۰/۷۷) که این موضوع طبیعی است، چون سافرانال محصول تجزیه پیکروکروسین است (Hosseinzadeh et al., 2025). بنابراین اکوتیپ‌هایی که کیفیت بیشتری دارند، معمولاً در همه مواد موثره برتری دارند.

این الگوی همبستگی نشان می‌دهد که انتخاب اکوتیپ‌های برتر برای تولید زعفران با کیفیت بالا باید بر اساس ترکیب صفات عملکردی (تعداد گل، وزن تر گل و وزن خشک کلاله) و صفات کیفی (مقادیر کروسین، پیکروکروسین و سافرانال) و نه صرفاً تعداد گل انجام شود.

تحلیل خوشه بندی سلسله مراتبی اکوتیپ‌ها بر اساس میانگین عملکرد کلاله

نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نشان داد که اکوتیپ‌های زعفران بر اساس میانگین عملکرد کلاله در دو خوشه اصلی قرار می‌گیرند. الگوی ادغام در جدول ۸ و شکل ۱ نشان می‌دهد گروهی از اکوتیپ‌ها در فاصله‌های بسیار پایین ادغام شده‌اند و گروه دیگر در فاصله‌های بالاتر قرار گرفته‌اند.

در مراحل اولیه ادغام، اکوتیپ‌هایی که بیشترین شباهت را داشتند، با مقادیر بسیار پایین ضریب تعیین نیمه‌جزئی در کنار یکدیگر قرار گرفتند (جدول ۸). بر این اساس اکوتیپ‌های قاین-حاجی‌آباد و زاوه-حشمت‌آباد در نخستین مرحله ادغام شده‌اند و یک خوشه بسیار نزدیک را تشکیل داده‌اند (شکل ۱). پس از آن اکوتیپ‌های قاین-بیناباج و رشتخوار-براکوه نیز با فاصله بسیار کم ادغام شده‌اند که نشان‌دهنده رفتار مشابه این اکوتیپ‌ها از نظر عملکرد کلاله است (شکل ۱). در مراحل بعدی خوشه‌های اولیه با اکوتیپ‌های دیگر ترکیب شده‌اند؛ به این صورت که خوشه حاصل از ادغام اکوتیپ‌های قاین-حاجی‌آباد و زاوه-حشمت‌آباد با خوشه قاین-بیناباج و رشتخوار-برکوه ترکیب شده و خوشه بزرگ‌تری را تشکیل داده است (شکل ۱). این ادغام‌ها که با مقادیر پایین

نشان‌دهنده اکوتیپ‌هایی با رفتار متفاوت‌تر و عملکرد کمتر مشابه است. در نهایت فاصله بسیار زیاد در مرحله آخر ادغام (۰/۸۳۱۳) نشان می‌دهد که دو خوشه اصلی اکوتیپ‌ها کاملاً متفاوت بوده‌اند و ادغام آن‌ها باعث افزایش شدید ناهمگنی شده است (جدول ۸). این فاصله زیاد بیانگر استقلال ساختاری دو گروه اکوتیپ‌هاست و نشان می‌دهد که اکوتیپ‌های زعفران از نظر عملکرد کلاله در دو مجموعه کاملاً مجزا قرار می‌گیرند. بر اساس جدول ۸ و شکل ۱ می‌توان گفت نزدیک‌ترین و همگن‌ترین اکوتیپ‌ها در کمترین فاصله بهم متصل شده‌اند (صفر یا نزدیک به صفر) و شاخه دندوگرام آن کوتاه‌ترین است. بنابراین اکوتیپ‌های قاین-حاجی‌آباد و زاوه-حشمت‌آباد نزدیک‌ترین و همگن‌ترین اکوتیپ‌ها در کل مجموعه مورد بررسی هستند و در مرحله بعد می‌توان به اکوتیپ‌های قاین-بیناباج و رشتخوار-براکوه اشاره کرد. چهار اکوتیپ ذکر شده هسته اصلی خوشه پایدار را تشکیل می‌دهند و از نظر میانگین عملکرد کلاله بیشترین شباهت را دارند.

ضریب تعیین نیمه‌جزئی انجام شده‌اند (جدول ۸)، بیانگر آن است که اکوتیپ‌های فوق از نظر عملکرد کلاله رفتار نزدیک و مشابهی داشته‌اند و یک گروه عملکردی منسجم را تشکیل می‌دهند. در مراحل میانی خوشه‌بندی، اکوتیپ‌های فردوس-باغستان، بیرجند-مود، بیرجند-مهمویی، گناباد-زبید و گناباد-شهر به تدریج به خوشه‌های قبلی اضافه شده‌اند (شکل ۱). افزایش تدریجی مقدار ضریب تعیین نیمه‌جزئی در این مراحل (جدول ۸) نشان می‌دهد که این اکوتیپ‌ها شباهت کمتری نسبت به گروه اولیه داشته‌اند، اما همچنان در یک خوشه عملکردی قابل قبول قرار می‌گیرند. این بخش معمولاً خوشه‌های متوسط را تشکیل می‌دهد و اکوتیپ‌هایی با عملکرد میانی را در کنار هم قرار می‌دهد. در مراحل پایانی اکوتیپ‌های قاین-شاهیک، گناباد-کاخک، فردوس-برون، گناباد-سقی و رشتخوار-فتح‌آباد در فاصله‌های بالاتر ادغام شده‌اند (شکل ۱). مقدار بالاتر ضریب تعیین نیمه‌جزئی (جدول ۸) در این مراحل بیانگر تفاوت بیشتر میان این اکوتیپ‌هاست. این گروه معمولاً

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی از خصوصیات اندازه‌گیری شده اکوتیپ‌های مختلف زعفران طی سال‌های آزمایش

Table 3. Analysis of variance (mean square) of quantitative and qualitative characteristics of different saffron ecotypes during the experimental years

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	تعداد گل Flower number	وزن تر گل Flower fresh weight	میانگین مربعات Mean Square			
				وزن خشک کلاله Stigma dry weight	کروسین Crocine	پیکروکروسین Picrocrocine	سافرانا Safranal
سال Year	1	7704 **	205.6	0.26 **	369.9 **	1385 **	770.8 **
خطای آزمایش (Ea)	4	780.1	65	0.06	63.69	2..38	0.06
اکوتیپ Ecotype	13	16011 **	1708 **	0.48 **	8226 **	199.9 **	61.96 **
سال × اکوتیپ (Year×Ecotype)	13	1286 **	55.12	0.03 **	10900 **	226.2 **	42.27 **
خطای کل (Et)	52	323.1	51.51	0.009	51.83	2.17	0.43

ns, *, ** : به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار و اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.
ns, * and **: represent on-significant and significant at 5% and 1% level, respectively.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات اصلی سال بر خصوصیات کمی و کیفی زعفران

Table 4. Comparison of the average main effects of years on quantitative and qualitative characteristics of saffron

سال year	تعداد گل در متر مربع Flower number (No/m ²)	وزن تر گل (گرم در مترمربع) Flower fresh weight (g/m ²)	وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع) Stigma dry weight (g/m ²)	کروسین - جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر (E1%1cm) Crocine - absorbance in 440 nm (E1%1cm)	پیکروکروسین - جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر (E1%1cm) Picrocrocin - absorbance in 257 nm(E1%1cm)	سافرانال - جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر (E1%1cm) Safranal - absorbance in 330 nm(E1%1cm)
1398-99	110.94 ^b	41.36 ^a	0.51 ^b	184.6 ^a	72.97 ^b	31.08 ^b
1399-400	130.09 ^a	44.47 ^a	0.63 ^a	180.4 ^b	81.09 ^a	37.14 ^a

میانگین‌ها با حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Mean followed by similar letters in each column are not significantly different at 5% level, according to Duncan test

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات اصلی اکوتیپ‌ها بر خصوصیات کمی و کیفی زعفران

Table 5. Comparison of the average main effects of ecotypes on quantitative and qualitative characteristics of saffron

اکوتیپ‌ها Ecotypes	تعداد گل در متر مربع Flower number (No/m ²)	وزن تر گل (گرم در مترمربع) Flower fresh weight (g/m ²)	وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع) Stigma dry weight (g/m ²)	کروسین - جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر (E1%1cm) Crocine - absorbance in 440 nm (E1%1cm)	پیکروکروسین - جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر (E1%1cm) Picrocrocin - absorbance in 257 nm(E1%1cm)	سافرانال - جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر (E1%1cm) Safranal - absorbance in 330 nm (E1%1cm)
بیرجند - مود Birjand - Moud	85.23 ^{ef}	29.72 ^{fgh}	0.35 ^{fg}	192 ^d	73.45 ^e	34.44 ^d
بیرجند - مهمویی Birjand - Mahmoudi	127.4 ^c	46.42 ^c	0.53 ^{de}	204.4 ^c	72.46 ^e	34.63 ^{cd}
قاین - شاهیک Qaen - Shahik	225.6 ^a	80.61 ^a	1.26 ^a	258.2 ^a	88.17 ^a	35 ^{cd}
قاین - حاجی آباد Qaen - Hajiabad	130.5 ^c	43.61 ^{cd}	0.46 ^{def}	131.7 ^f	67.74 ^g	28.57 ^g
قاین - بیناباج Qaen - Binabaj	113.5 ^{cd}	40.17 ^{cde}	0.47 ^{def}	185.5 ^d	80.91 ^c	37.04 ^a
گناباد - کاخک Gonabad - Kakhk	76.83 ^{fg}	29 ^{gh}	0.43 ^{ef}	208.3 ^c	83.01 ^b	37.17 ^a
فردوس - برون Ferdows - Boroun	184.4 ^b	64.45 ^b	0.81 ^c	190.3 ^d	73.67 ^e	30.24 ^f
فردوس - باغستان Ferdows - Baghestan	77.09 ^{fg}	28.74 ^{gh}	0.37 ^f	159.4 ^e	77.94 ^d	37.74 ^a
گناباد - سقی Gonabad - Saghi	209.5 ^a	67.01 ^b	1.04 ^b	161.3 ^e	76.72 ^d	35.96 ^b
گناباد - زبید Gonabad - Zibad	113.3 ^{cd}	42.27 ^{cde}	0.57 ^d	191.8 ^d	76.92 ^d	34.85 ^{cd}
گناباد - شهر Gonabad - Shahr	78.24 ^{efg}	33.31 ^{efg}	0.39 ^f	183 ^d	80.41 ^c	35.37 ^b
رشتخوار - فتح آباد Roshtkhar - Fathabad	57.49 ^g	20.86 ^h	0.25 ^g	111.8 ^g	70.34 ^f	28.30 ^g
رشتخوار - براکوه Roshtkhar - Barakouh	99.97 ^{de}	36.08 ^{defg}	0.47 ^{def}	221.1 ^b	84.12 ^b	37.04 ^a
زاوه - حشمت آباد Zaveh - Heshmatabad	107.9 ^{cd}	38.42 ^{cdef}	0.46 ^{def}	156.9 ^e	72.59 ^e	31.25 ^e

میانگین‌ها با حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Mean followed by similar letters in each column are not significantly different at 5% level, according to Duncan test

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرات متقابل سال × اکوتیپ‌ها بر خصوصیات کمی و کیفی زعفران

Table 6. Comparison of average interaction effects of year × ecotypes on quantitative and qualitative characteristics of saffron

سال Year	اکوتیپ‌ها Ecotypes	تعداد گل در متر مربع Flower number (No/m ²)	وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع) Stigma dry weight (g/m ²)	کروسین - جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر (E1%1cm) Crocine - absorbance in 440 nm (E1%1cm)	پیکروکروسین - جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر (E1%1cm) Picrocrocine - absorbance in 257 nm (E1%1cm)	سافرانیال - جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر (E1%1cm) Safranal - absorbance in 330 nm (E1%1cm)
1	بیرجند - سمود Birjand - Moud	80.88 kl	0.32 ijk	151.2 mm	65.03 a	26.35 m
	بیرجند - مهموئی Birjand - Mahmoudi	121.1 ghi	0.49 fgh	162.6 klm	60.83 op	28.56 kl
	قاین - شاهیک Qaen - Shahik	216.3 bc	1.19 b	245.9 c	80.36 fg	33.26 fgh
	قاین - حاجی آباد Qaen - Hajiabad	124.1 fgh	0.43 fghij	180.1 hi	76.79 ij	31.62 j
	قاین - بینابج Qaen - Binabaj	108.3 ghijk	0.44 fghij	198.1 j	77.28 hij	36.66 e
	گناباد - کاخک Gonabad - Kakhk	73.10 lm	0.41 fghij	218.6 ef	81.20 f	33.94 f
	فردوس - برون Ferdows - Boroun	178 de	0.77 cd	166.1 jkl	62.30 o	27.48 l
	فردوس - باغستان Ferdows - Baghestan	72.72 lm	0.35 hijk	73.9 r	65.10 a	32.08 ij
	گناباد - سغی Gonabad - Saghi	152.7 ef	0.73 cd	146.5 n	73.78 lm	33.94 f
	گناباد - زبید Gonabad - Zibad	92.50 ikl	0.46 fghi	198.5 j	75.25 jkl	32.75 ghi
	گناباد - شهر Gonabad - Shahr	83.29 kl	0.41 fghij	209 fg	76.23 ijk	31.50 j
	رشتخوار - فتح آباد Roshtkhar - Fathabad	49.56 m	0.21 k	126.7 o	66.57 a	24.19 n
	رشتخوار - براکوه Roshtkhar - Barakouh	93.62 ikl	0.43 fghij	285.6 a	88.34 c	34.05 f
	زاوه - سعادت آباد Zaveh - Heshmatabad	106.6 hijk	0.45 fghij	222.3 de	72.59 m	28.84 k
	بیرجند - سمود Birjand - Moud	89.57 jkl	0.37 ghijk	232.9 d	81.88 ef	42.53 a
	بیرجند - مهموئی Birjand - Mahmoudi	133.83 fgh	0.56 ef	246.2 c	84.09 de	40.70 b
	قاین - شاهیک Qaen - Shahik	234.86 b	1.32 ab	270.5 b	95.99 a	36.74 e
	قاین - حاجی آباد Qaen - Hajiabad	136.96 fg	0.49 fgh	83.34 q	58.70 p	25.52 m
	قاین - بینابج Qaen - Binabaj	118.70 ghij	0.50 fgh	172.9 ijk	84.54 d	37.47 de
	گناباد - کاخک Gonabad - Kakhk	80.56 kl	0.46 fghi	197.9 j	84.83 d	40.40 b
2	فردوس - برون Ferdows - Boroun	190.9 cd	0.85 c	214.5 ef	85.05 d	33 fghi
	فردوس - باغستان Ferdows - Baghestan	81.45 kl	0.40 ghij	244.9 c	90.78 b	43.41 a
	گناباد - سغی Gonabad - Saghi	266.29 a	1.36 a	176.06 hij	79.67 fgh	37.98 d
	گناباد - زبید Gonabad - Zibad	134.1 fgh	0.67 de	185.1 h	78.59 ghi	36.96 de
	گناباد - شهر Gonabad - Shahr	73.18 lm	0.38 ghij	156.9 lmn	84.60 d	39.23 c
	رشتخوار - فتح آباد Roshtkhar - Fathabad	65.42 lm	0.29 jk	97.02 p	74.12 klm	32.41 hij
	رشتخوار - براکوه Roshtkhar - Barakouh	106.3 hijk	0.51 fg	156.5 lmn	79.90 fg	40.04 bc
	زاوه - سعادت آباد Zaveh - Heshmatabad	109.1 ghijk	0.47 fghi	91.58 pq	72.59 m	33.66 fg

میانگین‌ها با حروف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

According to Duncan test, Means followed by similar letters in each column are not significant at 5% level

جدول ۷. ضرایب همبستگی ساده خصوصیات گل در اکوتیپ‌های مختلف زعفران

Table 5. Simple correlation coefficient of flower characteristics in different saffron ecotypes

تعداد گل در متر مربع Flower number (No/m ²)	وزن تر گل (گرم در مترمربع) Flower fresh weight (gr/m ²)	وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع) Stigma dry weight (gr/m ²)	کروسین - جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر (E1%1cm) Crocine - absorbance in 440 nm (E1%1cm)	پیکروکروسین - جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر (E1%1cm) Picrocrocin - absorbance in 257 nm (E1%1cm)	سافراناال - جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر (E1%1cm) Safranal - absorbance in 330 nm(E1%1cm)
تعداد گل (در متر مربع) Flower number (No/m ²)	1				
وزن تر گل (گرم در مترمربع) Flower fresh weight (gr/m ²)	0.96 **	1			
وزن خشک کلاله (گرم در مترمربع) Stigma dry weight (gr/m ²)	0.93 **	0.90 **	1		
کروسین - جذب نوری در ۴۴۰ نانومتر (E1%1cm) Crocine - absorbance in 440 nm (E1%1cm)	0.24 *	0.28 **	0.31 **	1	
پیکروکروسین - جذب نوری در ۲۵۷ نانومتر (E1%1cm) Picrocrocin - absorbance in 257 nm(E1%1cm)	0.16	0.16	0.28 **	0.71 **	1
سافراناال - جذب نوری در ۳۳۰ نانومتر (E1%1cm) Safranal - absorbance in 330 nm(E1%1cm)	0.05	0.03	0.14	0.43 **	0.77 **

جدول ۸. تاریخچه خوشه‌بندی وزن خشک کلاله اکوتیپ‌های زعفران بر اساس روش حداقل واریانس وارد

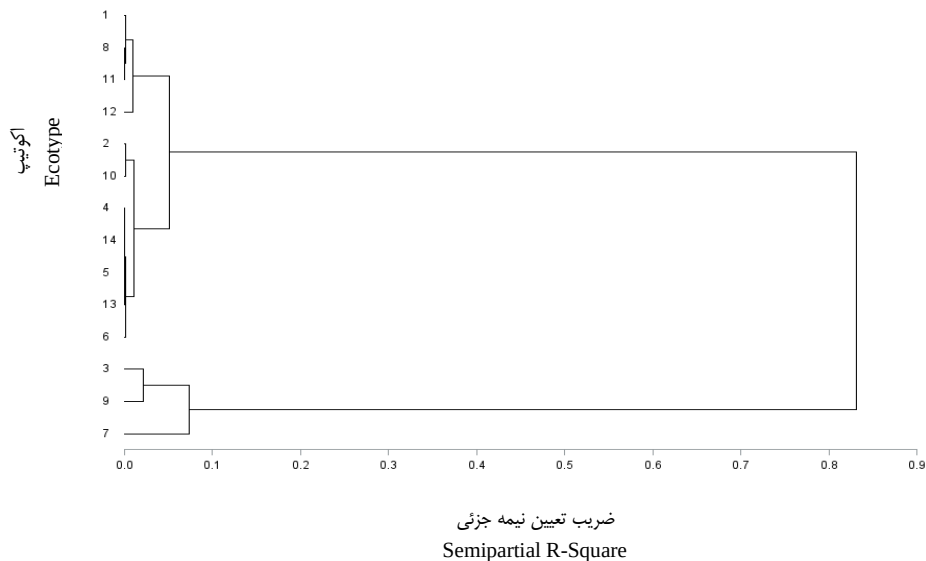
Table 8. Cluster history of Saffron ecotypes stigma dry weight based on Ward's Minimum Variance Method

تعداد خوشه Number of Clusters	صفات ادغام شده Clusters Joined	ضریب تعیین نیمه جزئی Semipartial R-Square
13	4+14	0.0000
12	5+13	0.0000
11	CL ₁₃ +CL ₁₂	0.0001
10	8+11	0.0002
9	2+10	0.0007
8	1+CL ₁₀	0.0008
7	CL ₁₁ +6	0.0009
6	CL ₈ +12	0.0100
5	CL ₉ +CL ₇	0.0106
4	3+9	0.0217
3	CL ₆ +CL ₅	0.0508
2	CL ₄ +7	0.0731
1	CL ₃ +CL ₂	0.8313

۱: بیرجند - مود، ۲: بیرجند - مهمویی، ۳: قاین-شاهیک، ۴: قاین-حاجی آباد، ۵: قاین-بیناباج، ۶: گناباد-کاخک، ۷: فردوس-برون، ۸: فردوس-باغستان، ۹: گناباد-سقی،

۱۰: گناباد-زید، ۱۱: گناباد-شهر، ۱۲: رشتخوار-فتح آباد، ۱۳: رشتخوار-براکوه، ۱۴: زاوه-حشمت آباد

1: Birjand - Moud, 2: Birjand - Mahmoudi, 3: Qaeen- Shahik, 4: Qaeen- Hajiabad, 5: Qaeen-Binabaj, 6: Gonabad- Kakhk, 7: Ferdows- Boroun, 8: Ferdows- Baghestan, 9: Gonabad- Sagh, 10: Gonabad- Zibad, 11: Gonabad- Shahr, 12: Roshtkhar- Fathabad, 13: Roshtkhar- Barakouh, 14: Zaveh- Heshmatabad



شکل ۱. خوشه بندی وزن خشک کلاله اکوتیپ‌های زعفران بر اساس روش پیوند میانگین

Fig 5. Clustering of saffron traits based on the average linkage method

۱: بیرجند - مود، ۲: بیرجند - مهمویی، ۳: قاین-شاهیک، ۴: قاین-حاجی آباد، ۵: قاین-بیناباج، ۶: گناباد-کاخک، ۷: فردوس-برون، ۸: فردوس-باغستان، ۹: گناباد-سقی، ۱۰: گناباد-زبید، ۱۱: گناباد-شهر، ۱۲: رشتخوار-فتح آباد، ۱۳: رشتخوار-براکوه، ۱۴: زاوه-حشمت آباد
1: Birjand – Moud, 2: Birjand – Mahmoudi, 3: Qaeen- Shahik, 4: Qaeen- Hajiabad, 5: Qaeen-Binabaj, 6: Gonabad- Kakhk, 7: Ferdows- Boroun, 8: Ferdows- Baghestan, 9: Gonabad- Saghi, 10: Gonabad- Zibad, 11: Gonabad- Shahr, 12: Roshtkhar- Fathabad, 13: Roshtkhar- Barakouh, 14: Zaveh- Heshmatabad

نتیجه‌گیری

می‌دهند؛ به‌طوری که اکوتیپ‌هایی که در یکی از این صفات برتر بودند، در دو صفت دیگر نیز عملکرد بالایی داشتند. در مقابل، صفات کیفی شامل کروستین، پیکروکروستین و ساfranال نیز با هم همبستگی بالا داشته و یک گروه کیفی مستقل را شکل دادند. بررسی اثر متقابل اکوتیپ × سال نشان داد که الگوی برتری اکوتیپ‌های انتقالی در سال‌های مختلف حفظ شده است. اکوتیپ قاین-شاهیک در هر دو سال در گروه‌های آماری بالا قرار گرفت و تغییرات صفات عملکردی آن حداقل بود و این موضوع نشان‌دهنده پایداری بین‌سالی این اکوتیپ است. اکوتیپ فردوس-برون نیز با وجود نوسان متوسط بین سال‌ها، در هر دو سال عملکرد قابل قبولی ارائه داد. اکوتیپ بیرجند-مود نیز رفتار نسبتاً پایدار داشت و افت آن در سال دوم شدید نبود. در مقابل، برخی از اکوتیپ‌های بومی گناباد مانند گناباد-زبید و گناباد-سقی علاوه بر عملکرد پایین، نوسان بیشتری در اثر متقابل داشتند و پایداری بین‌سالی ضعیفی نشان دادند. نکته مهم آن است که نتایج اثرات اصلی، اثر متقابل و خوشه‌بندی نوع متفاوتی از رفتار اکوتیپ‌ها را نشان

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین اکوتیپ‌های مورد بررسی از نظر صفات عملکردی و کیفی زعفران تفاوت معنی‌دار وجود دارد، به‌طوری که برخی اکوتیپ‌های منتقل‌شده به گناباد توانستند عملکرد بالاتری نسبت به اکوتیپ‌های بومی نشان دهند. بررسی میانگین اثرات اصلی اکوتیپ‌ها نشان داد که اکوتیپ قاین-شاهیک با میانگین ۲۲۵/۶ گل در متر مربع، ۸۰/۶۱ گرم وزن تر گل و ۱/۲۶ گرم وزن خشک کلاله، بالاترین عملکرد را ارائه داد و به‌عنوان برترین اکوتیپ انتقال‌یافته در شرایط گناباد شناخته شد. پس از آن، اکوتیپ‌های فردوس-برون و بیرجند-مهمویی نیز عملکرد قابل توجهی داشتند، اما هیچ‌کدام به سطح اکوتیپ قاین-شاهیک نرسیدند. در مقابل، اکوتیپ‌های بومی گناباد مانند گناباد-کاخک با میانگین ۷۶/۸۳ گل و ۰/۴۳ گرم وزن خشک کلاله در گروه‌های پایین‌تر قرار گرفتند و عملکرد ضعیف‌تری داشتند. در همین راستا تحلیل همبستگی نیز نشان داد که صفات عملکردی شامل تعداد گل، وزن تر گل و وزن خشک کلاله دارای همبستگی بسیار قوی با یکدیگر هستند و یک مجموعه عملکردی منسجم را تشکیل

نزدیک و همگن را تشکیل داده‌اند. در مقابل، اکوتیپ‌های قاین-شاهیک، گناباد-کاخک، فردوس-برون، گناباد-سقی و رشتخوار-فتح‌آباد در فاصله‌های بالاتر ادغام شده‌اند و یک خوشه متفاوت‌تر را تشکیل داده‌اند که بیانگر تفاوت عملکردی بیشتر میان آن‌هاست. فاصله نهایی زیاد میان دو خوشه نشان‌دهنده جدایی ساختاری و استقلال عملکردی این دو گروه اکوتیپ است.

به‌طور کلی، ترکیب نتایج تجزیه واریانس (اثرات اصلی و متقابل)، تحلیل همبستگی و خوشه‌بندی اکوتیپ‌ها نشان می‌دهد که اکوتیپ‌های غیر بومی گناباد، به‌ویژه قاین-شاهیک و فردوس-برون، سازگاری مطلوبی با شرایط اقلیمی گناباد داشته و ضمن حفظ برتری عملکردی در سال‌های مختلف، توانسته‌اند عملکرد بالایی در این منطقه ارائه دهند. این موضوع اهمیت انتخاب اکوتیپ‌های مناسب و استفاده از منابع ژنتیکی متنوع را برای افزایش عملکرد و کیفیت زعفران در مناطق مختلف تأیید می‌کند.

با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده علاوه بر ارزیابی اکوتیپ‌های زعفران از مناطق بیشتر، مطالعات چندساله طولانی‌تر و بررسی‌های مولکولی و مدیریتی نیز انجام گیرد تا ضمن تأیید نتایج حاضر، امکان شناسایی دقیق‌تر اکوتیپ‌های برتر و توسعه برنامه‌های به‌نژادی فراهم شود.

می‌دهند. تجزیه اثرات اصلی میزان برتری عملکردی را مشخص می‌کند و بر این اساس اکوتیپ قاین-شاهیک بالاترین عملکرد را دارد. اثر متقابل، پایداری بین‌سالی را ارزیابی می‌کند و نشان داد که اکوتیپ قاین-شاهیک نوسان کمتری بین سال‌ها داشته و از این نظر پایدارتر بوده است. در مقابل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی براساس میانگین عملکرد کلالة، شباهت رفتاری میان اکوتیپ‌ها را مشخص می‌کند و نه میزان برتری؛ به همین دلیل اکوتیپ‌های قاین-حاجی‌آباد و زاوه-حشمت‌آباد به‌عنوان نزدیک‌ترین و همگن‌ترین اکوتیپ‌ها در یک خوشه قرار گرفته‌اند، در حالی که اکوتیپ قاین-شاهیک با وجود عملکرد بسیار بالا، رفتار عملکردی مشابهی با سایر اکوتیپ‌ها نداشته و در مراحل بالاتر ادغام شده است. این تفاوت نشان می‌دهد که برتری عملکردی لزوماً به معنای شباهت ساختاری در خوشه‌بندی نیست.

نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی اکوتیپ‌ها نیز این الگو را تأیید کرد و نشان داد که اکوتیپ‌های زعفران بر اساس میانگین عملکرد کلالة در دو خوشه مستقل قرار می‌گیرند. خوشه اول شامل اکوتیپ‌های با عملکرد بالا و رفتار مشابه (قاین-حاجی‌آباد، زاوه-حشمت‌آباد، قاین-بیناباج، رشتخوار-براکوه، فردوس-باغستان، بیرجند-مود، بیرجند-مهمویی، گناباد-زبید و گناباد-شهر) بود که در پایین‌ترین سطح فاصله ادغام شده‌اند و یک گروه بسیار

منابع

- Alavi Siney, S. M., Saba, J., Siahpirani, A. F., & Nasiri, J. (2023). ISSR-assisted spatial genetic structure, population admixture, and biodiversity estimate across locally adopted saffron ecotypes from 18 different provenances of Iran. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 2-15. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100467>
- Babaei, S., Talebi, M., Bahar, M., & Zeinali, H. (2014). Analysis of genetic diversity among saffron (*Crocus sativus*) accessions from different regions of Iran as revealed by SRAP markers. *Scientia Horticulturae*, 171, 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.033>
- Baghalian, K., Shahbani Sheshtamad, M., & Jamshidi, A. H. (2010). Genetic variation and heritability of agro- morphological and phytochemical traits in Iranian saffron (*Crocus sativus* L.). *Industrial Crops and Products*, 31, 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.12.010>
- Cardone, L., Castronuovo, D., Perniola, M., Cicco, N., Molina, R. V., Renau-Morata, B., & Candido, V. (2021). *Crocus sativus* L. ecotypes from Mediterranean countries: Phenological, morpho-productive, qualitative and genetic traits. *Agronomy*, 11(3), 551-568. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030551>
- Fernández, J. A., Santana, O., Guardiola, J. L., Molina, R. V., Heslop-Harrison, P., Borbely, G., & Talou, T. (2011). The world saffron and *Crocus* collection: Strategies for establishment, management, characterisation and utilisation. *Genetic Resources and Crop*

- Evolution, 58 (1), 125–137.
<https://doi.org/10.1007/s10722-010-9601-5>
- Hosseinzadeh, L., Salami, A. R., Ebrahimi, M., & Izadi-Darbandi, A. (2025). Investigating the Genetic Diversity of Different Iranian Saffron Accessions Using Multivariate Statistical Methods [Genetic diversity of different Iranian saffron ecotypes using multivariate statistical methods]. *Journal of Crop Improvement*, 27(1), 69–89. [in Persian].
<https://doi.org/10.22059/jci.2025.378342.2890>
- Kouzegaran, S., Mousavi-Baygi, M., Babaeian, I., & Khashei-Siuki, A. (2020). Future projection of the effects of climate change on saffron yield and spatial-temporal distribution of its cultivation by incorporating the effect of extreme climate indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(3–4), 1109–1118.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03241-0>
- Molina R.V., Garcia-Luis A., Coll V., Ferrer C., Valero M., Navarro Y., & Guardiola J.L. (2005). Flower Formation in the Saffron *Crocus* (*Crocus sativus* L.). The Role of Temperature. *Scientia Horticulturae*, 103 (3), 361–379.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.06.005>
- Moraga, A.R., Rambla, J.L., Ahrazem, O., Granell, A., & Gomez, L. (2009). Metabolite and target transcript analysis during *Crocus sativus* stigma development. *Phytochemistry*, 70, 1009–1016.
<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2009.04.022>
- Omidbeigi, R., Sadeghi, B., & Ramezani, A. (2000). Effects of cultivation region on saffron quality. *Iranian Journal of Horticultural Sciences and Techniques*, 4 (3–4), 167–187. [in Persian]
- Siracusa, L., Gresta, F., Avola, G., Albertini, E., Raggi, L., Lombardo, G. M., & Ruberto, G. (2013). Agronomic, chemical and genetic variability of saffron (*Crocus sativus* L.) of different origin by LC-UV-vis-DAD and AFLP analyses. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 60(2), 711–721.
<https://doi.org/10.1007/s10722-012-9868-9>
- Soukrat, S., Metougui, M. L., Gabone, F., Nehvi, F., Abousalim, S., Benlaahabib, O. (2019). Study of diversity in some Moroccan population of saffron (*Crocus sativus* L.). *African Journal of Agricultural Research*, 16, 759–769.
<https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13769>