

Impact of Climate Change on Saffron Production: Issues, Challenges, and Opportunities

Soroor Khorramdel^{1*}, and Atefeh Mirzaeian²

1- Associate Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

khorramdel@um.ac.ir

2- Ph.D. Student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Extended Abstract

Introduction

Climatic factors are regarded as the most important determinants of saffron yield, as this plant occupies a specific ecological niche in various regions around the world. Among these factors, temperature has been identified as the most significant environmental influence on flowering and the quality characteristics of saffron. The life cycle of saffron begins with the dormancy of the mother corms during the summer, a stage in which the corms show no morphological changes or visible growth. In spring, photosynthetic materials are transferred from the leaves to the corms, leading to the senescence and yellowing of the leaves from the tip toward the base. At this stage, the daughter corms have fully developed and are prepared for dormancy. Flower induction primarily occurs at high temperatures during the summer, after which it is essential for the plant to be exposed to lower temperatures to initiate flowering.

Saffron cultivation offers numerous environmental benefits, including climate regulation, pollination, air quality improvement, oxygen production, soil stabilization and conservation, biodiversity preservation, and carbon sequestration. The management practices employed by women in saffron fields tend to have a lower environmental impact due to their deep ecological knowledge, resulting in a reduced carbon footprint.

The objective of this article is to investigate the effects of climatic factors, particularly temperature and precipitation, on the growth characteristics, flower and corm yield, and quality attributes of saffron. To this end, some practical and sustainable management strategies for this crop are proposed.

Results and discussion

Temperature indicators such as the number of hot summer days, warm nights, maximum and minimum temperatures, and cold days throughout the year directly affect the growth stages of saffron, including flowering and the formation of daughter corms. The primary stages of vegetative and reproductive growth in saffron are influenced by climatic parameters, including the maximum allocation of dry matter to daughter corms, flowering induction, and flower emergence. In recent years, climate change has adversely impacted saffron growth through temperature fluctuations, cold stress, and damage from pests and diseases, leading to significant reductions in both yield quantity and quality. Increased temperatures during the flowering induction stage can result in lower yields due to delays in flowering, shorter flowering periods, and a decrease in the number of flowers. The process of flowering induction in summer halts at temperatures above 30 degrees Celsius and below 10 degrees Celsius. The optimal temperature for flowering induction in saffron is reported to be around 23 degrees Celsius. Additionally, temperatures above 23 degrees or below 15 degrees Celsius prevent flower emergence in autumn, with the ideal temperature for this stage being approximately 18 degrees Celsius. Rising temperatures negatively affect the duration of flowering, yield, and quality characteristics of the flowers while also shortening the flowering period. In addition to

temperature, other climatic factors such as precipitation also influence saffron production. For instance, decreased rainfall combined with increased evapotranspiration can lead to drought stress and reduced yields. Changes in precipitation patterns and an increase in extreme climatic events such as droughts, frosts, and floods directly impact saffron growth and development.

Conclusion

Overall, climate change significantly affects the yield of flowers, stigmas, and corms, as well as the quality characteristics of saffron. In recent years, climatic changes have led to a decline in both the yield and quality of saffron. Three critical sensitive periods for saffron plants concerning climatic parameters include maximum allocation of photosynthetic materials to daughter corms, flower induction, and flower emergence. An increase in temperature above optimal levels during these periods severely reduces yield. Elevated temperatures during the flowering period result in delayed onset and reduced duration of this phase, causing a substantial decrease in flower yield.

Given saffron's higher economic and ecological resilience in integrated agricultural-livestock systems, it is essential to implement effective management strategies that enhance the resilience of agricultural systems by incorporating saffron cultivation. To address the challenges posed by climate change and maintain sustainable saffron production, it is recommended to adopt principles of sustainable and ecological intensification in agricultural systems. This can be achieved by improving nutrient use efficiency and replacing chemical fertilizers with eco-friendly inputs. Additionally, incorporating nitrogen-fixing species in crop rotations, inoculating with mycorrhizae and other microorganisms, practicing intercropping, planting cover crops, applying superabsorbents, utilizing plant hormones, foliar feeding with nutrients and humic acid, managing irrigation, ensuring appropriate planting depth, and relocating fields to cooler climates are suggested strategies.

Furthermore, to enhance soil organic matter and control summer temperatures, the application of mulch and planting cover crops, along with sustainable weed management through the removal and placement of residues on the soil surface, should be considered. These practices can also directly influence flower and corm performance and quality, thereby mitigating the negative effects of climate change.

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

Keyword: Ecological niche, Flowering duration, Global warming, Intercropping, Ecological intensification.

اثر تغییر اقلیم بر تولید زعفران: مسائل، چالش‌ها و فرصت‌ها

سرور خرم‌دل^{۱*} و عاطفه میرزائیان^۲

۱- دانشیار گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد*

khorramdel@um.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

عوامل اقلیمی به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد زعفران به عنوان گیاهی دارای آشیانه اکولوژیکی خاص در نقاط مختلف جهان محسوب می‌شوند. دما مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر بر گلدهی و ویژگی‌های کیفی زعفران شناسایی شده است. مراحل اصلی رشد رویشی و زایشی زعفران تحت تأثیر پارامترهای اقلیمی شامل تخصیص حداکثری ماده خشک به پیازهای دختری، القای گلدهی و ظهور گل است. افزایش دما در مرحله القای گلدهی می‌تواند از طریق تأخیر در گلدهی، کوتاه‌تر شدن دوره گلدهی و کاهش تعداد گل منجر به کاهش عملکرد شود. دمای بهینه برای القای گلدهی و ظهور گل در زعفران به ترتیب حدود ۲۳ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. افزایش دما بر طول دوره گلدهی، عملکرد و ویژگی‌های کیفی گل اثر نامطلوب داشته و مدت زمان گلدهی را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش بارندگی همراه با افزایش تبخیر-تعرق می‌تواند منجر به تنش خشکی و کاهش عملکرد شود. همچنین، تغییر در الگوی بارش و افزایش رویدادهای حدی به صورت مستقیم بر رشد و نمو زعفران اثر منفی می‌گذارند. از جمله راهبردهای فشرده‌سازی اکولوژیک کشت زعفران شامل انتقال به مناطق اقلیمی خنک‌تر، کاربرد هورمون‌های زیستی و سوپر جاذب‌ها، تلقیح با میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد، تنظیم تراکم و عمق کشت، تناوب زراعی، مدیریت آبیاری، کشت مخلوط، کشت گیاهان پوششی، مدیریت بقایای گیاهی، حفظ بقایای علف‌های هرز روی سطح خاک، کوددهی، تغذیه برگی و مدیریت سن مزرعه بوده که برای بهبود سازگاری و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی توصیه می‌شوند.

کلمات کلیدی: آشیانه اکولوژیکی، کشت مخلوط، گرمایش جهانی، فشرده‌سازی اکولوژیک، طول دوره گلدهی.

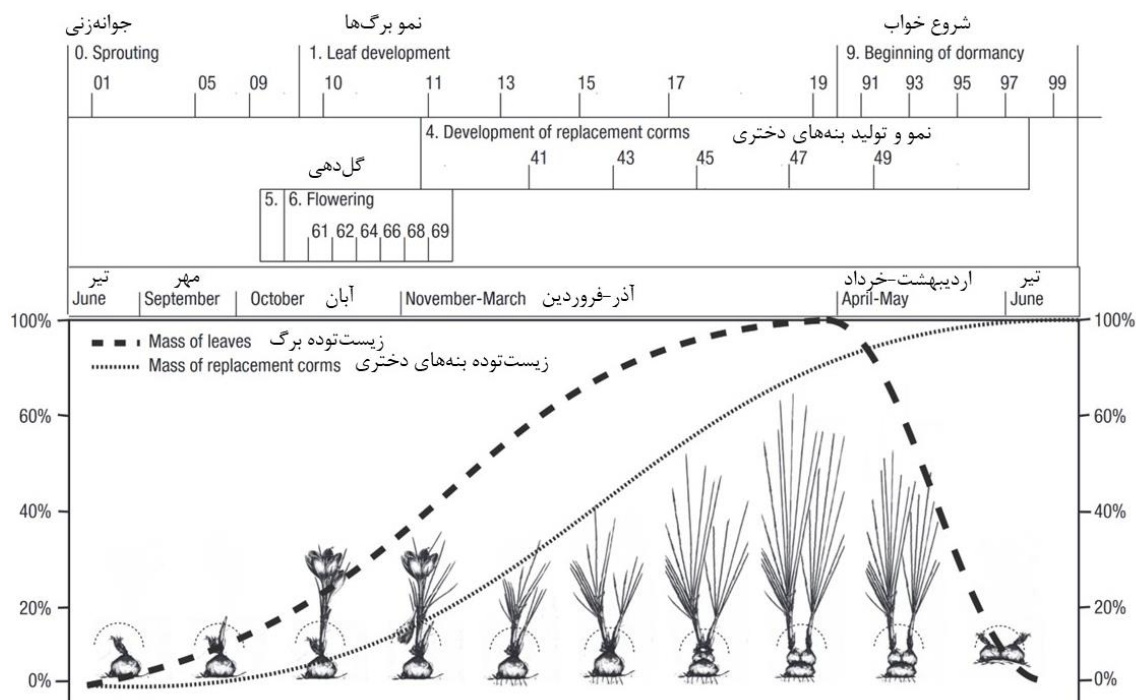
مقدمه

زعفران زراعی (*Crocus sativus* L.) گیاهی گل‌دار، متعلق به خانواده زنبق^۱، ژئوفیت، پاییزی، تک‌لپه، عقیم و بدون ساقه است (Molina et al., 2004; Douglas et al., 2014; Gresta et al., 2017; Ali et al., 2018; Nemati et al., 2019). زعفران، کاربردهای متعددی در صنایع غذایی، آرایشی، بهداشتی و دارویی دارد (Aminifard & Amiri, 2021). منشأ این گیاه ایران معرفی شده و در عرض‌های جغرافیایی ۳۶-۳۲ درجه و تا ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح دریا قابل کشت است (Shokati et al., 2016; Koocheki & Khajeh-Hosseini, 2020). در حال حاضر، ایران با بیش از ۹۰ درصد تولید زعفران در رتبه

اول جهانی قرار داشته (FAO, 2024) و کیفیت بالای این گیاه در این منطقه، دلیل اصلی اهمیت و ارزش بالای اقتصادی این گیاه ادویه‌ای ارزشمند محسوب می‌شود.

زعفران با توجه به آشیانه اکولوژیکی شده و خصوصیات منحصر به فرد زراعی از جمله گیاهان بسیار ارزشمند در مناطق با کمبود آب محسوب می‌شود (Mollafilabi & Khorramdel, 2016; Khorramdel et al., 2022b). زعفران از اردیبهشت تا مهر ماه در حالت خواب باقی مانده و در این مدت فاقد اندام‌های رویشی است. اگر چه بنه‌های زعفران در تابستان در حالت خواب قرار دارند، القای گلدهی معمولاً در این دوره اتفاق می‌افتد و دما به عنوان مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر بر گلدهی، نقش کلیدی در القای این مرحله ایفا می‌کند (Kumar et al., 2022; Molina et al., 2005). به دلیل نیاز آبی کم، زعفران در مناطق دارای بارندگی سالانه کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر، با دامنه ارتفاع ۲۸۰۰-۶۵۰ متری از سطح دریا (دارای اقلیم نیمه‌گرمسیری مطلوب با میانگین ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا) به خوبی رشد می‌کند (Bicharanlou, 2017) و از این رو، توسعه کشت این گیاه ارزشمند در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور از نظر اقتصادی و اجتماعی بسیار حائز اهمیت است (Behdani & Fallahi, 2015).

به طور کلی، مراحل مهم رشدی زعفران در طی دوره رشد رویشی شامل سه مرحله رشد برگ، بنه‌های دختر و پیری و در مرحله زایشی شامل القای گلدهی و ظهور گل بوده که طول هر مرحله به شرایط اقلیمی به ویژه دمای محیط بستگی دارد؛ به طوری که هر گونه افزایش یا کاهش دما، ویژگی‌های رشد و عملکرد کمی و کیفی آن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Koocheki et al., 2010). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، چرخه زیستی زعفران با خواب بنه‌های مادری در تابستان آغاز می‌شود که ظاهراً در این مرحله بنه‌ها هیچ گونه تغییر مورفولوژیکی و رشد ظاهری ندارند، ولی تغییرات فیزیولوژیکی و مورفونتیکی در آن‌ها رخ می‌دهد (Lopez- Corcoles et al., 2015).



شکل ۱. مراحل رشد و نمو زعفران بر اساس ماه‌های سال (Lopez- Corcoles et al., 2015)

Fig 1. Growth and developmental stages in saffron based on months of the year (Lopez-Corcoles et al., 2015)

در بهار، با افزایش دمای روزانه و کاهش محتوی رطوبتی خاک، ریشه‌ها می‌میرند، مواد فتوسنتزی از برگ‌ها به بنه‌ها منتقل شده و برگ‌ها از نوک به سمت قاعده شروع به پیری و زرد شدن می‌کنند. در این مرحله بنه‌های دختره کاملاً رشد کرده و آماده خواب می‌شوند (Lopez- Corcoles et al., 2015). القای گلدهی زعفران عمدتاً در دماهای بالا و طی تابستان اتفاق می‌افتد. پس از تکمیل این دوره، لازم است که گیاه در معرض دماهای پایین قرار گیرد تا گلدهی آغاز شود (Koocheki et al., 2008).

اهمیت اکولوژیکی و اقتصادی زعفران

میانگین درآمد به ازای هر هکتار سطح زیرکشت زعفران حدود شش برابر هزینه‌های تولید آن گزارش شده و این مقدار سوددهی تقریباً هشت برابر هزینه‌های تولید آن گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که این محصول، سود اقتصادی قابل توجهی برای کشاورزان به همراه دارد (Abolhassani et al., 2020) و با ایجاد اشتغال، به بهبود معیشت و امنیت غذایی خانوارهای روستایی و همچنین ارائه خدمات و کارکردهای مختلف بوم‌نظام کمک شایانی می‌نماید (Khorramdel et al., 2018a). تولید زعفران در استان‌های خراسان عمدتاً متکی بر دانش بومی کشاورزان بوده و به‌عنوان نوعی فعالیت کشاورزی خانوادگی و پایداری به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل سازگاری این گیاه با شرایط اقلیمی متغیر و از طرفی، ارائه خدمات ارزشمند زیست‌محیطی، نقش بسزایی در حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کند. در حال حاضر، سیاست‌های مبنی بر صادرات غیرنفتی در ایران نیز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان زعفران در جهان، اهمیت این محصول را به‌عنوان یکی از کالاهای صادراتی و

راهبردی کشور پررنگ‌تر نموده و آن‌را به‌عنوان نوعی منبع درآمدی پایدار برای بهبود معیشت کشاورزان معرفی نموده است (Rastegarpour & Mohammadi, 2018). بر این اساس، این محصول به‌عنوان گیاهی راهبردی برای توسعه کاشت به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است (Kumar et al., 2008; Golmohammadi, 2014; Koocheki et al., 2017; Khilare et al., 2019).

تعدیل اقلیم، گرده‌افشانی، بهبود کیفیت هوا، تولید اکسیژن، تثبیت خاک، حفظ تنوع زیستی و ترسیب کربن از جمله مهم‌ترین مزیت‌های زیست‌محیطی تولید زعفران معرفی شده است (Abolhassani et al., 2020; Khorramdel et al., 2018). نتایج مطالعه خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2018a) نشان داد که بوم‌نظام‌های زعفران علاوه بر خدمات تأمین‌کننده، خدمات مختلفی در سایر گروه‌های خدماتی شامل تنظیم‌کننده، حمایتی و فرهنگی نظیر گرده‌افشانی، تعدیل اقلیم، حفاظت خاک، حفظ تنوع زیستی و خدمات فرهنگی را نیز ارائه می‌دهد که ارزش اقتصادی آن‌ها قابل توجه بوده و ارتباط تنگاتنگی با دستیابی به اهداف توسعه پایدار به‌ویژه در زمینه کاهش فقر و حفاظت از محیط‌زیست به همراه دارد؛ این محققان، میانگین ارزش خدمات تنظیم‌کننده، فراهم‌کننده، تنوع زیستی و فرهنگی مزارع زعفران در استان خراسان رضوی را به ترتیب $۵۴/۲۱ \times ۱۰^۶$ ، $۶۰/۲۴ \times ۱۰^۶$ و $۴۷/۱ \times ۱۰^۶$ ریال در هکتار در سال برآورد نمودند.

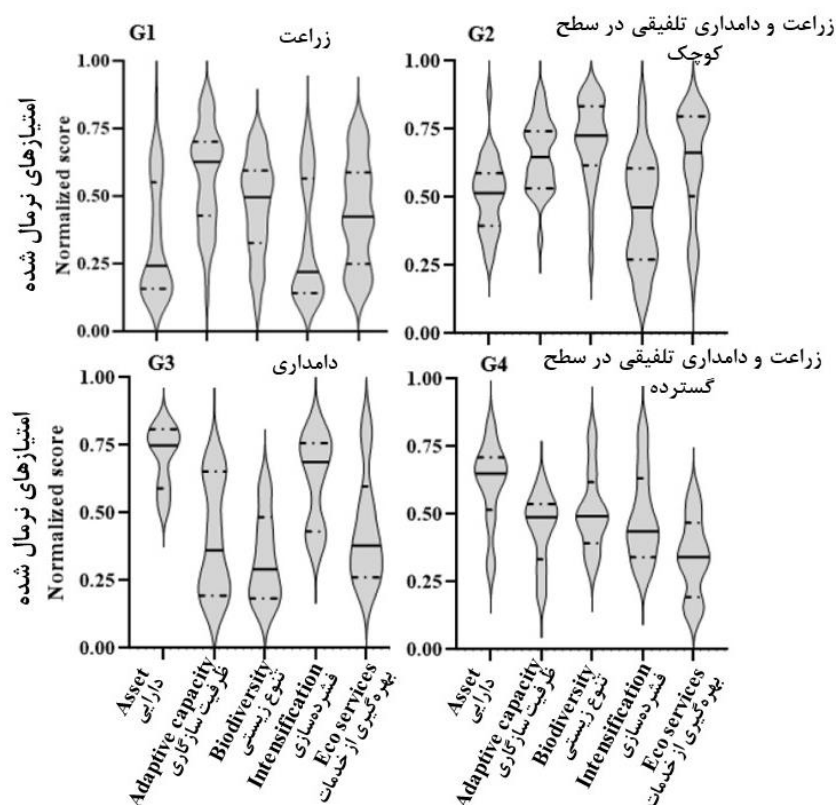
زنان در مزارع زعفران به دلیل دانش و آگاهی زیست‌محیطی ذاتی عمیق آنها نسبت به مدیریت پایدار منابع طبیعی، پیامدهای زیست‌محیطی کم‌تری بر جای می‌گذارند (Khorramdel et al., 2018a; Khorramdel et al., 2019) و موجب کاهش ردپای کربن می‌شوند (Khorramdel et al., 2021). در این راستا، خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2018b) چنین نتیجه گرفتند مزارع زعفران که بر پایه کشاورزی خانوادگی و بهره‌گیری از توانایی زنان مدیریت می‌شوند، خدمات و کارکردهای مختلفی چون ترسیب کربن را ارائه نموده و با اتخاذ روش‌های مدیریت اکولوژیکی و کاهش استفاده از نهاده‌های خارجی و شیمیایی، می‌توان به‌طور قابل‌توجهی بر ارزش خدمات بوم‌سازگانی این محصول افزود. طی مطالعه‌ای دیگر، خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2019) گزارش کردند که اثرات زیست‌محیطی مزارع کوچک در واحد سطح کمتر است و با افزایش سطح زیرکشت، اثرات زیست‌محیطی بدلیل مدیریت فشرده و رایج این محصول تشدید می‌شود. علاوه بر این، مطالعات نشان داده است که اثرات زیست‌محیطی تولید زعفران در مزارع رایج به‌طور معنی‌داری بیشتر از مزارع اکولوژیک و کم‌نهاده است (Rezvani Moghaddam et al., 2022).

از آنجا که بخش بزرگی از انرژی مورد نیاز در تولید زعفران توسط منابع تجدیدپذیر چون نیروی کار انسانی و کود دامی تأمین می‌شود، این گیاه به‌عنوان محصولی پایدار و دوستدار محیط‌زیست نیز معرفی شده است (Khorramdel et al., 2020b). به‌طور کلی، ارزش خدمات اکوسیستمی مزارع زعفران بیشتر از هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید این محصول گزارش شده است (Khorramdel et al., 2018a)؛ به طوری که میانگین ارزش خدمات مزارع زعفران در استان خراسان با کسر تبعات منفی

برابر با $10^{-6} \times 136/57$ ریال در هکتار در سال برآورد شده است. بر این اساس، با توجه به اینکه کاشت زعفران معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک با انرژی خورشیدی فراوان انجام می‌شود، امکان استفاده بیشتر و پایدار از این انرژی نامحدود با هدف کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توصیه شده است (Abolhassani et al., 2020).

خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2020b) گزارش نمودند که تهیه بنه و مصرف برق برای پمپاژ آب، دو ورودی انرژی اصلی در مزارع زعفران در استان خراسان رضوی هستند. همچنین علی‌رغم عملکرد اقتصادی پایین‌تر زعفران نسبت به گندم، شاخص بوم‌شناخت آن بالاتر محاسبه شد؛ ضمن اینکه بررسی شاخص‌های اقتصادی این دو محصول نیز حاکی از ارزش اقتصادی بالاتر زعفران است که به نوعی عملکرد کمتر آن را جبران نموده و به دلیل تأثیر مثبت‌تر این محصول بر محیط‌زیست، از ارزش اکولوژیکی بالاتری نسبت به گندم برخوردار است. البته به نظر می‌رسد که دستیابی به عملکرد اقتصادی بالاتر در زعفران بر عملیات به‌زراعی دقیق برای افزایش عملکرد و بهبود کارایی استفاده از نهاده‌ها متمرکز است.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بوم‌نظام‌های کشاورزی تلفیقی با کشت زعفران در استان خراسان رضوی، عمدتاً از تاب‌آوری اقتصادی و اکولوژیکی بالاتری برخوردار هستند. در این راستا، نقی‌پور و همکاران (Naghipour et al., 2024) طی مطالعه‌ای روی مقایسه نظام‌های مختلف کشاورزی در استان خراسان رضوی گزارش نمودند که مؤلفه‌های تاب‌آوری در نظام‌های تلفیقی زراعی و دامی بیشتر از آوری نظام‌هایی است که تنها بر مبنای تولیدات دامی یا زراعی مدیریت می‌شوند. همچنین در مدیریت تلفیقی زراعت و دامداری، کشت زعفران ضمن بهبود عملکرد و افزایش تاب‌آوری، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر بهبود وضعیت اقتصادی و درآمد کشاورزان دارد (شکل ۲).



شکل ۲. توزیع فراوانی امتیاز نرمال شده مولفه‌های تاب‌آوری برای نظام‌های مختلف کشاورزی در استان خراسان رضوی
 G₁: زراعت، G₂: تلفیق زراعت و دامداری در سطح کوچک، G₃: دامداری و G₄: تلفیق زراعت و دامداری در سطح گسترده.

Figure 2. Frequency distribution of normalized score of each resilience component for different agricultural systems in Khorasan Razavi Province

G₁: Agronomy only, G₂: Integrated management of agronomy+ animal husbandry in small level, G₃: Animal husbandry only and G₄: Integrated management in extensive level.

با این وجود، منابع علمی نشان می‌دهند که مطالعات اندکی به بررسی مزایای اکولوژیکی و خدمات و کارکردهای نظام‌های زعفران مانند حفظ تنوع زیستی، بهبود کیفیت خاک و آب و تأمین معیشت جوامع محلی پرداخته است؛ بنابراین، ضروری است که مطالعات بیشتری با تکیه بر دیدگاه‌های اکولوژیک در نظام‌های تولید زعفران انجام شود.

تحلیل اثر عوامل اقلیمی و تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد زعفران

همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، اقلیم یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید زعفران بوده که توسعه کشت این گیاه را در نقاط مختلف جهان تحت‌تأثیر قرار داده و نقش بسزایی بر عملکرد کمی و کیفی این محصول ارزشمند دارد (Molina et al., 2005; Koocheki et al., 2010; Koocheki et al., 2018; Koozehgaran et al., 2020; Chourak et al., 2021; Farrokhi et al., 2021; Sahabi & Moallem, 2021; Pirasteh-Anosheh, 2023; Koocheki, 2024; Khorramdel, 2024; Moradi, 2024). این گیاه دارای ارزش اقتصادی بالا بوده و در مناطق مختلف جغرافیایی کشت می‌شود، با این حال، شرایط اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده، نقش تعیین‌کننده‌ای در پراکنش جغرافیایی و عملکرد آن دارد (Husaini, 2014). مطالعات نشان می‌دهد که تابستان‌های گرم، بارندگی‌های پاییزی و زمستان‌های معتدل، شرایط اقلیمی

مطلوبی را برای کشت این گیاه فراهم می‌کنند (Ghorbani & Koocheki, 2017). لازم به ذکر است که سازگاری این محصول با شرایط اقلیمی مناطق مختلف به‌ویژه از نظر دما، تأثیر مستقیمی بر گلدهی و عملکرد آن دارد (Koocheki et al., 2017). اگرچه تحقیقات نشان می‌دهند که شرایط محیطی و اقلیمی، وضعیت توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی، مدیریت زراعی و خصوصیات بنه تأثیر بسزایی بر عملکرد کلالة، اجزای عملکرد و خصوصیات کیفی زعفران ایفا می‌کنند، با این‌وجود، کیفیت و کمیت این محصول بیشتر تحت تأثیر شرایط اقلیمی است (Pirasteh-Anosheh, 2023; Koocheki et al., 2010; Siracusa et al., 2010). در این راستا، تحقیقات مؤید آن است که دما مهم‌ترین عامل اقلیمی تأثیرگذار بر کشت زعفران بوده و تغییرات دمایی با تأثیر بر طول دوره رشد به‌ویژه در مرحله گلدهی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی عملکرد و کیفیت آن را تحت تأثیر قرار دهد. البته علاوه بر دما، عوامل دیگری مانند محتوی رطوبت خاک، میزان بارندگی، نور خورشید و طول روز نیز بر عملکرد این محصول مؤثر هستند (Koocheki & Khajeh-Hosseini, 2020). در این راستا، مولینا و همکاران (Molina et al., 2005) گزارش نمودند که دما به‌طور مؤثری بر مراحل رشد رویشی و زایشی زعفران تأثیرگذار است (جدول ۱).

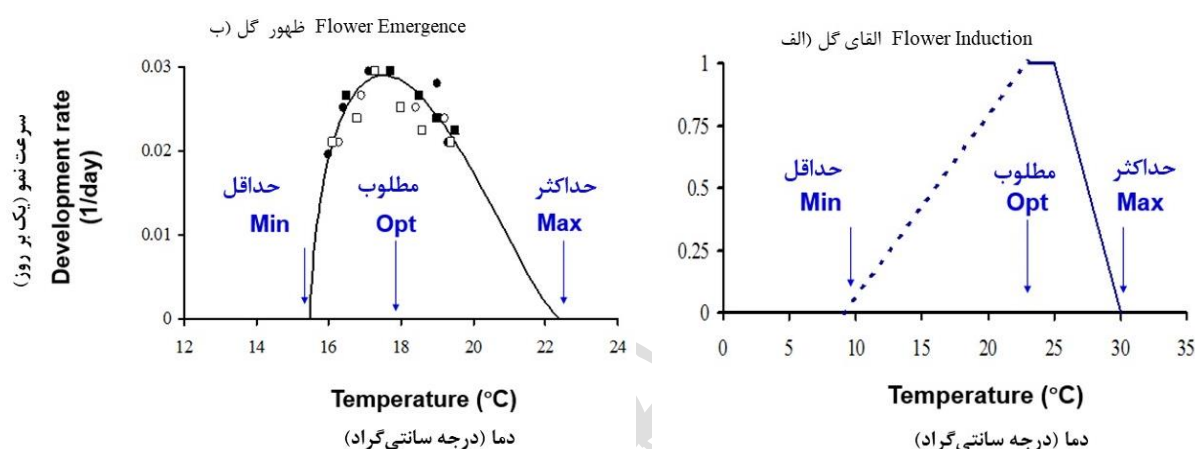
جدول ۱. اثر دمای نگهداری بر رشد اندام‌های هوایی و شاخص‌های گلدهی زعفران (Molina et al., 2005)

Table 1. The influence of incubation temperature on shoot growth and flowering indicators of saffron (Molina et al., 2005)

پارامتر Parameter	دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)		
	23	25	27
طول اندام هوایی (میلی‌متر) Shoot apex length (mm)	16.9 a	8.8 b	6.3 c
مرحله گلدهی Flowering stage	8.9 a	8.0 b	7.0 c
تعداد روز تا مرحله گلدهی Days to flowering stage	123 a	128 b	141 c
تعداد گل در هر بنه Flowers number per corm	2.2	2.2	2.3
عملکرد کلالة (میلی‌گرم در هر گل) Yield of stigma (mg per flower)	10.3	10.2	10.3

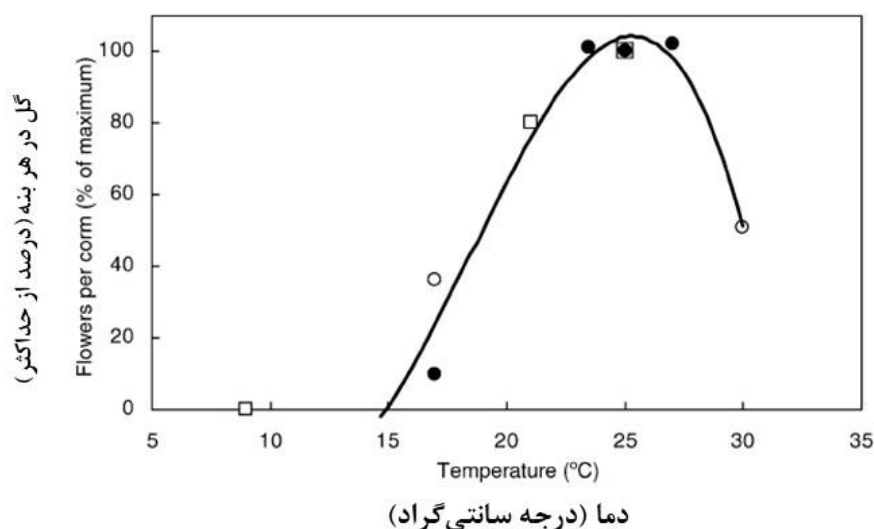
همان‌طور که پیش از این نیز عنوان شد، سه مرحله اصلی و مهم در فاز زایشی زعفران شامل القای گلدهی، ظهور گل و حداکثر میزان تخصیص ماده خشک به بنه‌های دختری به شدت وابسته به عوامل اقلیمی و به‌ویژه دما می‌باشد. کوزه‌گران و همکاران (Koozegaran et al., 2011) گزارش نمودند که شاخص‌های اقلیمی شامل میانگین و حداقل دما در ماه‌های مهر، آبان، آذر و دی و دمای حداکثر در ماه‌های آبان، آذر، دی و اسفند، مهمترین دماهای مؤثر بر عملکرد زعفران هستند. بیشترین کاهش عملکرد زعفران در ایران در نتیجه افزایش دما در ماه‌های فروردین و خرداد گزارش شده است، به این ترتیب که هر درجه

سانتی‌گراد افزایش دما در این دو ماه، حدود ۱۸/۵ درصد کاهش عملکرد را به همراه دارد (Koocheki, 2024). این یافته‌ها حاکی از حساسیت بالای زعفران در پاسخ به تغییرات دمایی می‌باشد (Koocheki et al., 2010). دما طی ماه‌های خرداد (موثر بر مرحله القای گل) تا آبان (موثر بر مرحله ظهور گل) به‌طور مستقیم بر القاء، تحریک و ظهور گل در زعفران تأثیر می‌گذارد. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2010) دامنه دمایی مطلوب برای القای گلدهی زعفران را ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد گزارش نموده و نتیجه گرفتند که القای گلدهی در تابستان در دمای بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد و پایین‌تر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌گردد. علاوه بر این، دماهای بالاتر از ۲۳ درجه و کمتر از ۱۵ درجه سانتی‌گراد در پاییز ظهور گل را متوقف می‌کند؛ بهترین دما برای وقوع این مرحله در حدود ۱۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (شکل ۳).



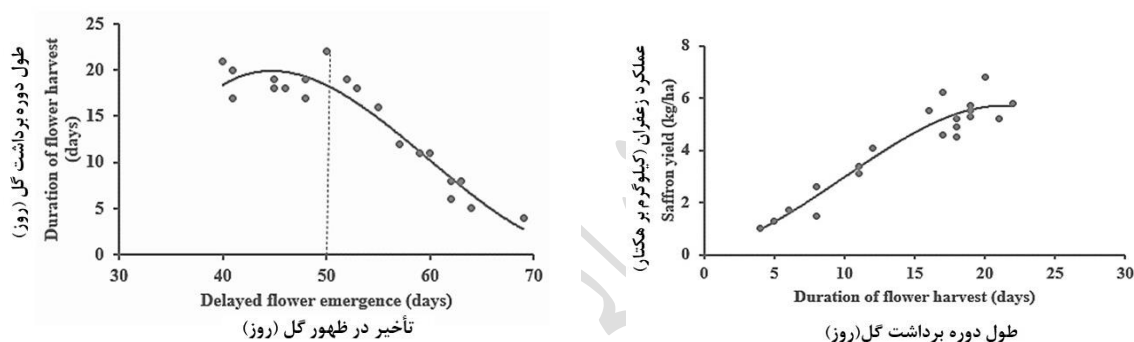
شکل ۳. دامنه دمایی کاردینال برای مراحل القای گلدهی (راست) و ظهور گل (چپ) در زعفران (Koocheki et al., 2010)
Fig 3. Cardinal temperature range for flower induction (right) and flower emergence (left) stages in saffron (Koocheki et al., 2010)

با توجه به مطالعات انجام شده دمای بهینه برای شکستن خواب و ظهور گل زعفران از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Ahrazem et al., 2010)، به طوری که برخی مطالعات نشان داده است گلدهی در بنه‌هایی که در مرحله اولیه کاشت بیش از ۵۰ روز در دمای ۲۳ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد و سپس در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند، رخ می‌دهد (Molina et al., 2004; Molina et al., 2005). طول دوره القای گلدهی در مطلوب‌ترین شرایط با دامنه دمایی بهینه برابر با ۱۵-۲۳ درجه سانتی‌گراد، معادل ۱۵۰-۱۰۰ روز گزارش شده است (شکل ۴). علاوه بر این، مشخص شده است که عملکرد تابع طول دوره گلدهی در زعفران است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش طول دوره گلدهی از ۵ تا ۲۰ روز عملکرد افزایش می‌یابد. همچنین طول دوره گلدهی تابع زمان ظهور گل است، به طوری که با تأخیر در زمان ظهور گل، طول دوره گلدهی افت می‌نماید. البته تأخیر در زمان ظهور گل بیشتر از ۵۰ روز، طول دوره گلدهی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد (شکل ۵) (Koocheki, 2024).



شکل ۴. تأثیر دما بر تعداد گل در هر بنه زعفران (Molina et al., 2005)

Fig 4. The effect of temprature on the number of flowers per corm of saffron (Molina et al., 2005)

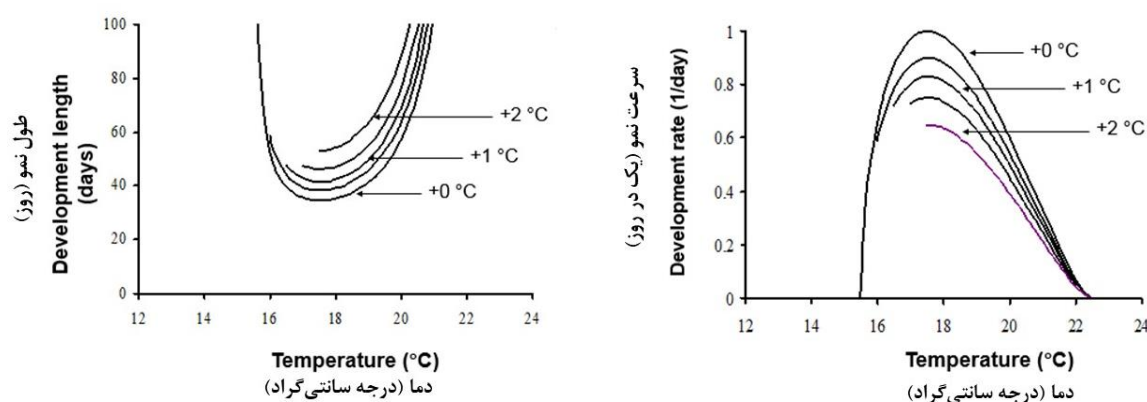


شکل ۵. تأثیر تأخیر در ظهور گل بر طول دوره گلدهی و عملکرد زعفران (Koocheki, 2024)

Fig 5. The impact of delayed flower emergence on duration of flower harvest and yield of saffron (Koocheki, 2024)

پس از مرحله القای گلدهی که معمولاً طی فصل تابستان تحت تأثیر دمای بالا صورت می گیرد، مرحله ظهور گل در پاییز با سرد شدن هوا آغاز می شود. گلدهی زود هنگام، می تواند پس از ۱۰۵ روز قرارگیری در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و سپس قرارگیری بنه ها در دمای ۱۷ درجه سانتی گراد رخ دهد (Molina et al., 2005). در شرایط بهینه، این دوره حدود ۵۰ روز به طول می انجامد و دامنه دمایی مطلوب برای این مرحله رشدی در شرایط کنترل شده ۱۵-۱۷ درجه سانتی گراد گزارش شده است (شکل های ۲ و ۳). تأخیر در تشکیل گل، همچنین بر کیفیت و عملکرد گل تأثیر دارد و تأخیر بیش از ۵۰ روز، عملکرد را به شدت کاهش می دهد (Koocheki, 2024) که این مسئله نشان دهنده اهمیت تأثیر دما و زمان نگهداری بنه بر گلدهی زعفران است. براین اساس، مشخص است که با درک بهتر تأثیر دما بر رشد و نمو زعفران، می توان راهبردهای بهتری را برای مدیریت توسعه کاشت زعفران همراه با افزایش عملکرد و کیفیت آن اتخاذ نمود. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش

دما در مرحله القای گلدهی از طریق تأخیر در گلدهی، تسریع در طول دوره گلدهی و سرعت نمو موجب کوتاه‌تر شدن طول دوره گلدهی، کاهش تعداد گل و در نهایت، افت عملکرد زعفران می‌شود (Koocheki et al., 2010).



شکل ۶. تأثیر دما بر طول دوره گلدهی و سرعت نمو در زعفران (Koocheki et al., 2010)

Fig 6. The impact of temperature on the length of flowering stage (left) and development rate (right) of saffron (Koocheki et al., 2010)

شاخص‌های دمایی مانند تعداد روزهای تابستان، تعداد شب‌های گرم، حداکثر و حداقل دما و تعداد روزهای سرد به‌طور مستقیم بر مراحل رشد و نمو زعفران از جمله گلدهی و تشکیل بنه‌های دختری تأثیرگذار هستند (Kouzegaran et al., 2020). نتایج دیگر مطالعات، حاکی از تأثیر میانگین و دمای حداکثر به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای مؤثر بر عملکرد زعفران می‌باشد (Sahabi & Moallem Banhanghi, 2021). نوسانات دمایی حتی در فاصله‌های زمانی کوتاه‌مدت، رفتار گلدهی زعفران را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند (Koocheki et al., 2010). علاوه بر این، افزایش دما در مرحله ظهور گل، سرعت نمو را کاهش و طول دوره رشد را افزایش می‌دهد و در این شرایط، گیاه قادر به طی مراحل نمو نبوده و مرحله گلدهی به صورت کامل انجام نمی‌گردد (شکل ۶).

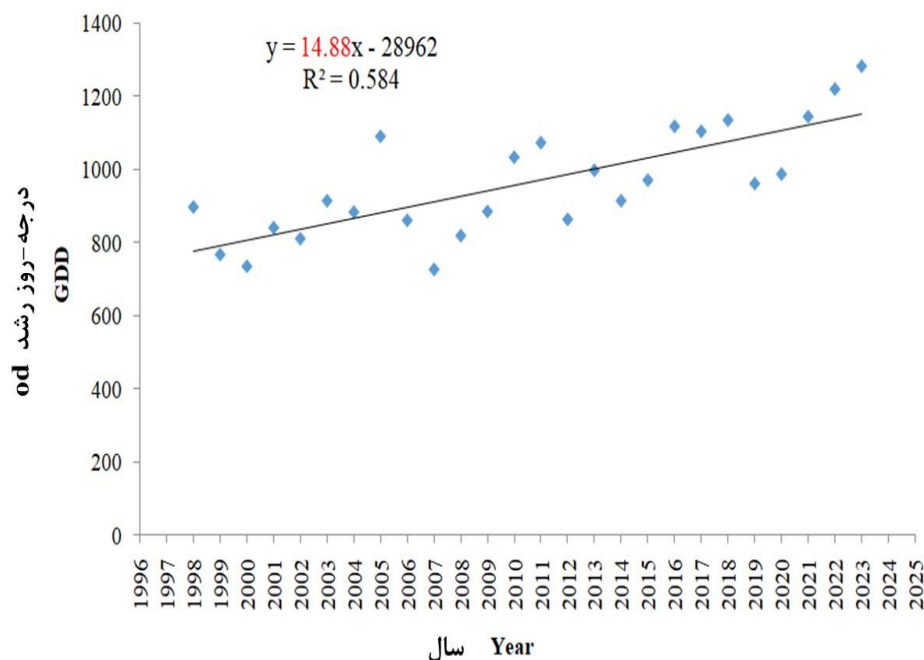
افزایش میانگین دما تحت تأثیر تغییرات اقلیمی منجر به تأخیر در ظهور و تشکیل گل و از طرفی، کاهش طول دوره گلدهی در زعفران می‌شود (Koocheki et al., 2018). صحابی و معلم بنه‌نگی (Sahabi & Moallem Banhanghi, 2021) نشان دادند که متغیر میانگین دما، حدود ۴۲ درصد از تغییرات عملکرد زعفران در شهرستان تربت‌حیدریه را توصیف نموده و در سایر شهرستان‌های استان خراسان نیز متغیر حداکثر دما به‌عنوان عامل اصلی تغییرات عملکرد شناسایی و معرفی شد، به‌طوری که ۲۴-۵۶ درصد از تغییرات عملکرد به تغییر در شاخص‌های دمایی نسبت داده شد. در این پژوهش، این محققان چنین نتیجه گرفتند که روند عملکرد در آینده نزدیک (سال ۲۰۲۵) در شهرستان‌های استان خراسان به صورت کاهشی می‌باشد؛ به‌طوری که مشهد با شیبی در حدود ۰/۰۹ کیلوگرم در هکتار و کاشمر با شیبی در حدود ۰/۰۷ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب بیشترین و کمترین کاهش عملکرد را تجربه خواهند کرد (جدول ۲).

جدول ۲. رگرسیون گام به گام بین شاخص‌های اقلیمی و عملکرد زعفران در استان‌های خراسان (Sahabi & Moallem Benhangi, 2021)

Table 2. The stepwise regression between climatic parameters and saffron yield in Khorasan province (Sahabi & Moallem Benhangi, 2021)

شهرستان City	متغیرهای پیش‌بینی Predictive variables	ضریب بتا β coefficient	ضریب t t coefficient	مقدار P P value	ضریب تبیین R square	ضریب تبیین اصلاح شده Adjusted R square	ضریب F F coefficient	درجه آزادی df	مقدار P P value
تربت‌حیدریه Torbat- heydariye	میانگین دما Average temperature (°C)	-0.651	-3.831	0.001	0.423	0.349	14.674	1	0.001
مشهد Mashhad	حداکثر دما Max. temperature (°C)	-0.702	-4.407	0.000	0.493	0.467	19.423	1	0
کاشمر Kashmar	حداکثر دما Max. temperature (°C)	-0.494	-2.541	0.019	0.244	0.206	6.459	1	0.019
بیرجند Birjand	حداکثر دما Max. temperature (°C)	-0.614	-6.477	0.002	0.377	0.346	12.093	1	0.002
قائن Qayen	حداکثر دما Max. temperature (°C)	-0.750	-5.074	0.000	0.563	0.541	25.749	1	0

نتایج آنالیز رگرسیون گام‌به‌گام شاخص‌های اقلیمی در بلندمدت (شامل دمای حداقل و حداکثر و میانگین بارندگی ماهانه) با عملکرد زعفران در استان‌های خراسان نیز نشان داد که در بین متغیرهای اقلیمی، پارامترهای حداقل دما در فروردین و حداقل دما طی خردادماه بیشترین تأثیر را در توصیف تغییرات عملکرد زعفران در بیرجند داشتند؛ به‌طوری‌که ۶۶ درصد از تغییرات عملکرد تحت‌تأثیر این دو متغیر اقلیمی قرار گرفت (Hosseini et al., 2008). در این راستا، با توجه به پیش‌بینی افزایش میانگین دما (حدود ۱/۹-۱/۴ درجه سانتی‌گراد)، درجه- روز رشد به میزان ۱۵ درجه- روز در سال افزایش یافته که این امر منجر به زودرسی و به تبع آن افت عملکرد زعفران در شهرستان تربت‌حیدریه می‌شود (شکل ۷) (Moradi, 2024). مطالعاتی دیگر روی شبیه‌سازی پیش‌بینی مراحل نمو زعفران نشان داده شد که به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما، طول دوره گلدهی زعفران حداقل ۳۲ و حداکثر ۳۸ روز به تأخیر می‌افتد (Koocheki et al., 2009a).



شکل ۷. روند تغییرات درجه-روز رشد زعفران طی سال‌های ۱۴۰۳-۱۳۷۵ در شهرستان تربت حیدریه (Moradi, 2024)

Fig 7. GDD trend for saffron during 1996-2024 in Torbat-Heydarieh County (Moradi, 2024)

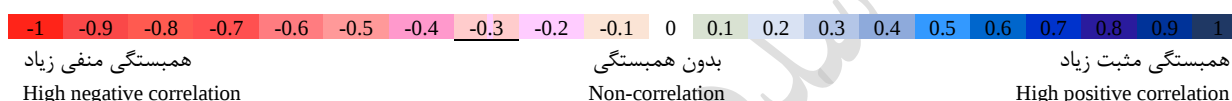
دامنه سطح زیرکشت زعفران در کشور بیشتر در استان خراسان متمرکز بوده که البته این سطح زیر کشت، به دلیل تغییرات اقلیمی در حال تغییر و گسترش است. در این خصوص، مطالعات اخیر مؤید جابه‌جایی مناطق کشت زعفران از اقلیم‌های گرم‌تر چون استان خراسان جنوبی به مناطق سردسیر مانند خراسان شمالی می‌باشد (Bicharanlou et al., 2017). در مناطق سردسیر کشت زعفران، حداکثر دما در طول فصل پاییز طی ماه‌های مهر، آبان و آذر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز نمی‌کند، در حالی که گاهی حداقل دما به صفر درجه سانتی‌گراد نیز کاهش می‌یابد (Kafi et al., 2006). این شرایط اقلیمی با نیازهای سرمای‌زی زعفران برای گذر از دوره خواب و آغاز رشد رویشی سازگار است. فرخی و همکاران (Farrokhi et al., 2021) همبستگی بالا و منفی بین میزان کروسین (۰/۷-) و پیکروکروسین (۰/۵۵-) در زعفران را با دمای حداکثر در تابستان گزارش کردند (جدول ۳). همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین مقدار کروسین با متوسط بارندگی سالانه برابر با ۰/۶ محاسبه شده که نشان‌دهنده تأثیر بارندگی بر کیفیت زعفران است. همچنین همبستگی منفی و بالایی بین عملکرد کلاله، مقدار کروسین و پیکروکروسین با حداکثر دما در تابستان گزارش شده است (Farrokhi et al., 2021) (جدول ۳). این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که دما تأثیر مستقیمی بر رشد و تولید گل و همچنین محتوای متابولیت‌های ثانویه در زعفران دارد.

جدول ۳. ضرایب همبستگی بین عوامل اقلیمی با عملکرد گل و کلاله و کیفیت زعفران (Farrokhi et al., 2021)

Table 3. Correlation coefficients between environmental and climatic traits with flower and stigma yield and quality of saffron (Farrokhi et al., 2021)

کروسین Crocine content	پیکروکروسین Picrocrocin content	سافرانال Safranal content	عملکرد کلاله Stigma yield	عملکرد گل Flower yield
---------------------------	------------------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------

رطوبت نسبی Relative humidity	0.25	0.28	0.18	0.22	0.31
دمای حداقل در زمستان Minimum temperature in winter	-0.38	-0.21	-0.27	0.05	0.29
دمای حداکثر در تابستان Maximum temperature in summer	-0.37	-0.55	-0.12	-0.55	-0.70
تعداد روزهای یخبندان سالانه Number of annual frost days	0.04	0.02	0.04	0.22	0.43
دمای متوسط سالانه Annual average temperature	-0.12	-0.15	-0.09	-0.25	-0.38
متوسط بارندگی سالانه Annual average rainfall	0.25	0.20	0.19	0.48	0.60
ارتفاع از سطح دریا Altitude	-0.30	-0.23	-0.19	-0.34	-0.44
عرض جغرافیایی Latitude	0.27	0.22	0.20	0.31	0.41
طول جغرافیایی Longitude	-0.10	-0.03	-0.16	-0.09	-0.09



نتایج مطالعه دیگری نیز تأیید نمود که خنک‌سازی محلول غذایی در کشت زعفران در شرایط بدون خاک، موجب افزایش محتوای کروسین، سافرانال و همچنین وزن گل گردید (Chourak et al., 2021) (جدول ۴).

جدول ۴. شاخص‌های گل و وزن کلاله زعفران در کشت بدون خاک تحت تأثیر دمای محلول غذایی (Chourak et al., 2021)
Table 4. Indicators of saffron flower and stigma weight under soilless culture according to nutrient solution temperature (Chourak et al., 2021)

ویژگی Characteristic	دمای محلول غذایی (درجه سانتی‌گراد) Nutrient solution temperature (°C)	
	10-15	4-5
تعداد گل در هر بنه No. of flowers/corm	2.61±0.19**	3.37±0.45
وزن کلاله (میلی گرم به ازای گل) Stigma weight (mg/flower)		
تر Fresh	40.72± 1.89 ^{ns}	42.60±1.99
خشک Dry	7.02±0.42*	8.46±0.96
طول کلاله (سانتی‌متر) Length of stigma (cm)		
تر Fresh	3.02± 0.42 ^{ns}	3.33±0.07
خشک Dry	2.28± 0.02 ^{ns}	2.31±0.05
قطر بنه در گیاه Diameter of corms/plant		
قطر کمتر از ۱/۵ سانتی‌متر Diameter<1.5 cm	22.00± 3.46 ^{ns}	22.00±2.32

قطر بیشتر از ۱/۵ سانتی متر Diameter > 1.5 cm	22.00 ± 2.45 ^{ns}	23.80 ± 3.11
وزن برگ (گرم در بنه) Leaf weight (g/corm)		
تر Fresh	78.57 ± 11.18 ^{ns}	81.13 ± 9.72
خشک Dry	23.72 ± 2.47 ^{ns}	23.80 ± 0.70
وزن ریشه (گرم در بنه) Root weight (g/corm)		
تر Fresh	16.85 ± 3.96 ^{ns}	12.38 ± 3.38
خشک Dry	2.32 ± 0.40 ^{ns}	1.75 ± 0.39

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح ۵ و ۱ درصد

زعفران برای ظهور گل به یک دوره سرمایی با دمای بهینه نیازمند است؛ به طوری که افزایش دما منجر به تأخیر در ظهور گل و حتی توقف کامل گلدهی می شود. همچنین دمای بالاتر از ۲۲ درجه سانتی گراد در پاییز، ظهور گل ها را متوقف می نماید. به ازای هر درجه افزایش دمای بالاتر از ۱۷ درجه سانتی گراد در این دوره رشدی، حدود ۱۴ روز به زمان ظهور گل افزوده می شود که در نهایت کاهش شدید عملکرد را به دنبال دارد (Molina et al., 2005; Koocheki et al., 2010; Koocheki, 2024).

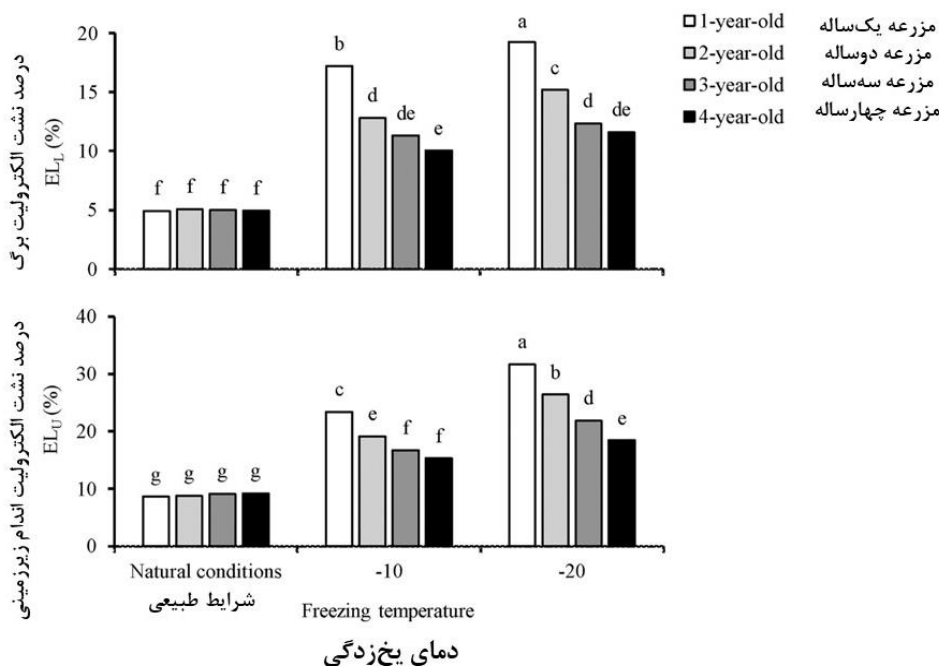
عوامل محیطی مؤثر بر رشد و نمو و عملکرد زعفران تنها شامل دمای بالا نیست، بلکه دماهای پایین نیز تنش محیطی محسوب می شوند؛ به طوری که قرارگیری این گیاه در معرض تنش یخ زدگی موجب بروز آسیب به اندام های هوایی و زیرزمینی این گیاه شده و در نتیجه عملکرد آن را کاهش می دهد؛ بنابراین از دمای پایین در فصل زمستان نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای محدودکننده رشد زعفران یاد می شود (Kafi et al., 2006; Koocheki & Seyyedi, 2019; Salteh & Amani, 2021; Azari et al., 2023; Jose-Santhi et al., 2023; Sanaei Nejad et al., 2024).

دمایی پایین چون سرما و یخ زدگی قرار می گیرند، تغییرات فیزیولوژیکی مختلفی در گیاهان شامل تغییر در ترکیب چربی غشای سلولی، تغییر در غلظت پروتئین ها و متابولیت ها و همچنین فعال شدن مکانیسم های دفاعی رخ می دهد (Azari et al., 2023).

یکی از مهم ترین مکانیسم های دفاعی گیاهان در برابر سرما، تجمع اسمولیت هایی مانند کربوهیدرات ها، پرولین و پروتئین های محلول بوده که مسئول تنظیم اسمزی تحت تنش هستند و از گیاهان در برابر آسیب های ناشی از یخ زدگی محافظت می کنند (Hasanuzzaman et al., 2019).

مطالعات نشان داده اند که وقوع یخبندان در طول دوره گلدهی و رشد بنه های دختری زعفران، می تواند منجر به مرگ گیاه شود (Salteh & Amani, 2021). همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، کاهش دما در بنه های برداشت شده از مزارع زعفران با سنین مختلف، باعث افزایش نشت الکترولیت ها در برگ ها و اندام های زیرزمینی و تجمع پرولین شده و میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها را به طور معنی داری کاهش می دهد (Koocheki & Seyyedi, 2019). بر این اساس همان طور که مشخص است، در مقابل دمای بالا که در طول مرحله خواب بنه باعث تحریک گلدهی

می‌شود، دمای پایین توقف رشد رویشی و گلدهی زعفران را به همراه دارد (Jose-Santhi et al., 2023) و همچنین وقوع مرحله رویشی و وجود برگ‌های سبز در زمستان در گیاه زعفران، این گیاه را نسبت به بروز تنش‌های سرمایایی شدید حساس می‌کند (Sanaei Nejad et al., 2024)، بنابراین، مشخص است که تغییر اقلیم از طریق افزایش و همچنین کاهش دمای هوا و بروز تنش‌های سرمایایی شدید، دارای اثر منفی بر رشد و نمو زعفران بوده و عملکرد آن را به شدت کاهش می‌دهند (Azari et al., 2023).

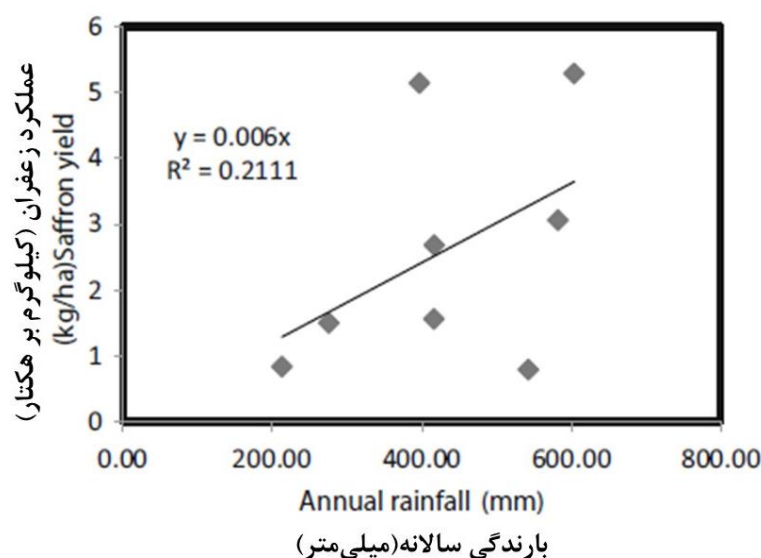


شکل ۸. اثر متقابل دمای یخ‌زدگی و سن مزرعه بر نشت الکتروولیت در برگ (EL_L) و اندام زیرزمینی (EL_U) زعفران (Koocheki & Seyyedi, 2019)

Fig 8. Interaction effect of freezing temperature and field age origin on electrolyte leakage in leaf (EL_L) and underground tissue (EL_U) of saffron (Koocheki & Seyyedi, 2019)

علاوه بر دما، میزان بارندگی نیز از دیگر عوامل اقلیمی مؤثر در تولید زعفران به‌خصوص در شرایط دیم است (Shaukat & Kafi, 2006; Dastranj et al., 2019; Kumar et al., 2022)؛ به طوری که میزان و توزیع زمانی بارندگی به‌طور مستقیم بر رشد رویشی و در نهایت، عملکرد گل و کلاله زعفران تأثیرگذار است (Sahabi & Moallem Banhanghi, 2021). بارندگی حدود ۴۰۴ میلی‌متر با توزیع منظم طی فصل رشد در زعفران مفید بوده و بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و در نتیجه افزایش عملکرد را به دنبال دارد. اگرچه نیاز آبی زعفران کم است، اما وقوع تنش‌های آبی ناشی از کمبود بارندگی به‌طور قابل توجهی بر رشد رویشی، نمو اندام‌های ذخیره‌ای و در نهایت، بر عملکرد تأثیر می‌گذارد (Shaukat & Kafi, 2006). بر این اساس، با توجه به سطح بالای زیرکشت زعفران در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و بروز تغییرات اقلیمی طی سال‌های اخیر کاهش و تأخیر در وقوع بارندگی‌های پاییزی، نیاز به آبیاری تکمیلی به‌منظور تأمین رطوبت مورد نیاز این گیاه است (Sephaskhah & Kamgar, 2009). مطالعات نشان می‌دهد که افزایش وقوع بارندگی (بالای ۶۰۰ میلی‌لیتر) موجب بهبود خطی عملکرد زعفران

می‌شود (Dastranj et al., 2019)، ولی همانطور که در شکل ۹ نیز مشخص است، باتوجه به نوسانات بالای عملکرد تحت تأثیر مقادیر بارندگی سالانه، به‌نظر می‌رسد که عملکرد به عوامل اقلیمی دیگری به ویژه دما به مراتب بیشتر از بارندگی وابسته می‌باشد. بر این اساس، کاهش قابل توجه تولید زعفران در استان خراسان نشان می‌دهد که افت عملکرد طی سال‌های اخیر تحت تأثیر کاهش محسوس بارندگی در فصول پاییز و زمستان، افزایش قابل توجه دما در فصول بهار و تابستان و همچنین کاهش شدید دما بوده است.



شکل ۹. ارتباط بین بارندگی سالانه و عملکرد زعفران (Dastranj et al., 2019)
Fig 9. Relationship between the annual rainfall and yield of saffron (Dastranj et al., 2019)

علاوه بر عوامل اقلیمی ذکر شده در فوق، گرمایش جهانی از طریق ذوب شدن یخ‌های قطبی باعث تغییر در گردان دمایی بین مناطق قطبی و عرض‌های میانی شده و این تغییرات دمایی، به‌طور بالقوه بر رفتار جریان‌های قطبی تأثیر گذاشته و سبب وقوع رخدادهای حدی شده که این پدیده‌های اقلیمی بر تولیدات کشاورزی از جمله گیاه زعفران طی فصل سرد سال نیز تأثیرگذار می‌باشند (Sanaei Nejad et al., 2024). سایر تحقیقات نیز نشان‌دهنده افزایش میانگین و مقادیر حدی دمای متوسط جهانی و همچنین افزایش فراوانی و شدت وقوع پدیده‌های حدی مانند موج‌های گرما، خشک‌سالی و سیلاب‌ها تحت تأثیر گرمایش جهانی می‌باشد (Kouzegaran et al., 2021) که این تغییرات می‌تواند عواقب اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه داشته باشد. طی بررسی وقوع رخدادهای حدی دمایی در شرق کشور در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰)، افزایش وقوع شاخص‌های حدی گرم مانند تعداد روزهای گرم و کاهش شاخص‌های حدی سرد مانند تعداد روزهای سرد در آینده پیش‌بینی شده است (Kouzegaran et al., 2021).

وقوع سرمای بی‌سابقه در اسفند ماه سال ۱۴۰۱ نیز به‌عنوان یکی از تبعات تغییر اقلیم، بخش قابل توجهی از مزارع زعفران در استان خراسان رضوی را تحت تأثیر قرار داده و خسارات قابل توجهی به عملکرد گل این گیاه وارد نمود. اگرچه اطلاعات دقیقی

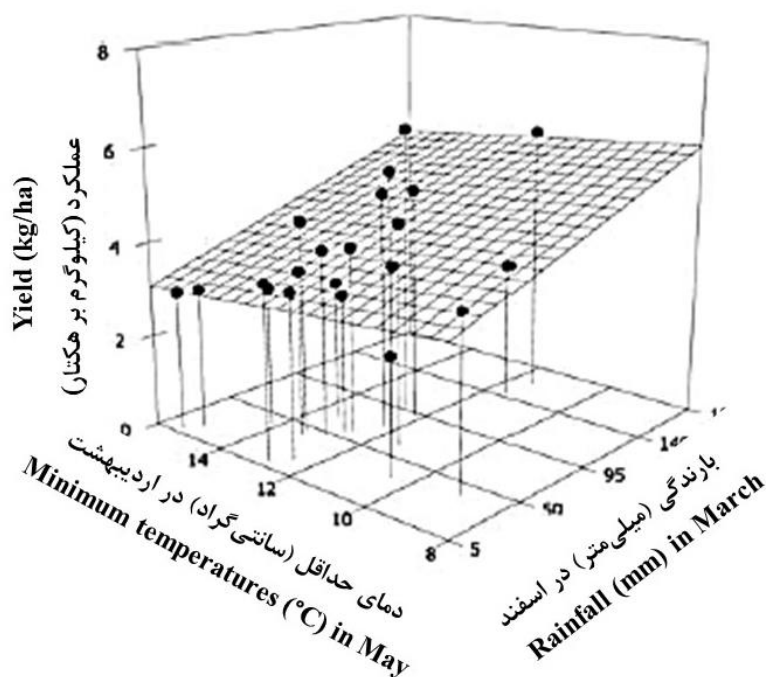
در مورد سهم این سرمای بی سابقه بر عملکرد زعفران وجود ندارد، اما شواهد موجود حاکی از کاهش چشمگیر عملکرد در مناطق آسیب دیده نسبت به میانگین چند ساله است (Sanaei Nejad et al., 2024). گیاه زعفران به دلیل رشد رویشی و نیاز به حفظ سبزیگی برگ ها در طول زمستان، حساسیت بالایی نسبت به سرما دارد؛ به طوری که وقوع سرمای شدید به بافت های گیاهی آسیب رسانده و منجر به کاهش تعداد گل و در نتیجه افت عملکرد می شود (Sanaei Nejad et al., 2024).

بنه زعفران به عنوان اندام ذخیره سازی، نقش مهمی در تولید گل و بنه های دختری ایفا می کند. از این رو، اندازه و سلامت بنه مادری برای حصول عملکرد مطلوب بسیار حائز اهمیت است. معلم و همکاران (Moallem et al., 2021) نشان دادند از آنجا که بعد از پایان رشد رویشی و حدوداً ۱۲۰ روز بعد از کاشت زعفران، نسبت سطح برگ کاهش و وزن بنه های دختری افزایش می یابد، افزایش دما همزمان با مرحله حداکثر میزان تخصیص ماده خشک به بنه های دختری در ماه های اسفند و فروردین، پژمردگی سریع برگ ها (پایان دوره تخصیص مواد فتوسنتزی) را به دنبال داشته که منجر به کوچک تر شدن بنه های دختری و در نتیجه افت عملکرد گل می شود. نتایج مطالعه ملافیلابی و همکاران (Mollafilabi et al., 2014) نشان داد که کاشت بنه های بالاتر از ۱۰ گرم خصوصیات رشدی و عملکرد کلالة زعفران را به طور معنی داری افزایش داد. بررسی ها نشان داده است که با افزایش وزن بنه، خصوصیات رشدی نظیر زمان لازم تا ظهور اندام هوایی، زیست توده، وزن خشک ریشه و تعداد جوانه های فعال افزایش می یابد (Koocheki et al., 2009b).

کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2022) گزارش نمودند که سن مزرعه زعفران بر عملکرد گل و بنه های دختری مؤثر است؛ به طوری که با افزایش سن مزرعه (بیش از ۵-۴ سال)، عملکرد گل و بنه های دختری کاهش می یابد. هر چند رابطه بین اندازه بنه و عملکرد زعفران در مطالعات مختلف بررسی شده است، اما اثر طول دوره تخصیص مواد فتوسنتزی و اندازه بنه بر عملکرد هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است و انجام مطالعات بیشتر در این زمینه می تواند به ارائه راهکارهای مدیریتی دقیق تر برای بهبود عملکرد مزارع زعفران به ویژه در شرایط تغییر اقلیم کمک کند.

مدل های پیش بینی اقلیمی نیز نشان می دهند که روند افزایش دما و کاهش بارندگی در آینده نیز ادامه خواهند داشت. در ارزیابی تأثیر پارامترهای اقلیمی بر رفتار گلدهی و عملکرد زعفران در استان های خراسان رضوی و جنوبی طی سال های ۱۳۹۷-۱۳۷۷ مشخص شد که به طور میانگین، ۳۳ درصد از مجموع بارندگی کاسته و ۰/۵ درجه سانتی گراد بر میانگین دما افزوده شده است. نتایج رگرسیون بین عملکرد و پارامترهای اقلیمی نیز نشان دهنده کاهش همزمان عملکرد با الگوهای افزایش دما و کاهش بارندگی است. علاوه بر این، یافته ها نشان می دهد که تغییرات اقلیمی نه تنها بر کمیت، بلکه بر کیفیت زعفران نیز تأثیر گذاشته است (Khorramdel, 2024). در این راستا، نتایج فرخی و همکاران (Farrokhi et al., 2021) نشان داد که کاهش بارندگی های پاییزی از طریق کاهش محتوی مواد مؤثره منجر به افت کیفیت زعفران می شود. در پژوهشی دیگر، حدود ۳۷ درصد از تغییرات عملکرد زعفران در منطقه تربت حیدریه به دو متغیر اقلیمی دمای حداقل در ماه اردیبهشت و مجموع بارندگی طی اسفند ماه

نسبت داده شد که بر این اساس، با افزایش دمای حداقل در اردیبهشت ماه، عملکرد کاهش و با افزایش بارندگی طی اسفند ماه عملکرد در فصل رشد بعدی به طور چشمگیری افزایش خواهد یافت (شکل ۱۰) (Hosseini et al., 2008). این یافته‌ها ضرورت اتخاذ رویکردهای جامع و مبتنی بر دانش به ویژه دانش بومی را برای مدیریت پایدار منابع آبی و همچنین بهبود مدیریت زراعی جهت سازگاری زعفران در مواجهه با تغییرات اقلیمی بیش از پیش آشکار می‌سازد.



شکل ۱۰. ارتباط بین بارندگی در اسفند و دمای حداقل در اردیبهشت با عملکرد زعفران (Hosseini et al., 2008)
Fig 10. Relationship between rainfall in March and minimum temperature in May with yield of saffron (Hosseini et al., 2008)

راهکارهای زراعی و آگرواکولوژیکی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم

همان‌طور که بیان شد، در سال‌های اخیر به‌منظور جبران کاهش عملکرد تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین، تنها سطح زیر کشت زعفران در کشور افزایش یافته که البته با توجه به کمبود منابع آبی، مدیریت مصرف آب در این شرایط حائز اهمیت است (Mahmudi & Abghari, 2024). با توجه به توسعه بی‌رویه سطح زیر کشت زعفران و همچنین مصرف کودهای شیمیایی، به ویژه نیتروژن، در مدیریت تولید این محصول، متوسط عملکرد این گیاه در ایران همچنان پایین‌تر از سایر کشورها (Koocheki, 2018) بوده و در حال حاضر با شیب منفی نیز در حال کاهش است (Zakiaghl et al., 2020). بر این اساس، پیشنهاد می‌شود به‌جای افزایش بی‌رویه سطح زیر کشت، افزایش تولید در واحد سطح از طریق فشرده‌سازی پایدار و اکولوژیک نظام‌های زراعی زعفران مدنظر قرار گیرد و همچنین سعی شود تا انرژی وارده به بوم‌نظام‌های تولید زعفران و مصرف سوخت‌های فسیلی از طریق به‌کارگیری راهکارهای اکولوژیکی کاهش داده شود.

تحقیقات نشان داده است که افزایش تولید و عملکرد زعفران در شرایط فعلی همراه با تخریب خاک و افت وضعیت حاصلخیزی عناصر غذایی همراه بوده و به‌جز با بهبود مدیریت زراعی ممکن نمی‌باشد. روند نزولی عملکرد این گیاه طی سال‌های اخیر ضرورت معرفی راهکارهای مختلف زراعی را بیش از پیش نمایان کرده است (Tan et al., 2005; Aytekin & Acikgoz, 2008; Zakiaghl et al., 2020). در این راستا، در شرایط گرمایش جهانی، یکی از راهکارهای زراعی انتقال مزارع کشت زعفران به مناطق سردتر به‌عنوان راهبردی جایگزین برای حفظ و افزایش بهره‌وری این محصول است (Gresta et al., 2017; Koocheki et al., 2018; Souret & Weathers, 2000). همچنین به‌منظور افزایش عملکرد زعفران به‌ویژه در شرایط بروز تغییرات اقلیمی، مدیریت صحیح مزرعه از جمله زمان و نحوه کاشت، عمق و تراکم کاشت بذر، مدیریت حاصلخیزی، مدیریت آبیاری، مدیریت خاک، مدیریت علف‌های هرز و سن مزرعه از دیگر راهکارهای مؤثر معرفی شده‌اند (Khorramdel et al., 2020a; Pirasteh-Anoshe et al., 2023; Khajeh-Hosseini & Fallahpour, 2020). مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

با توجه به نقش مهم نیتروژن در انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه تشدید اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، فشرده‌سازی پایدار سیستم‌های زراعی از طریق افزایش کارایی مصرف نیتروژن و جایگزینی نهاده‌های شیمیایی با نهاده‌های بوم‌سازگار شامل بهره‌گیری از کودهای دامی، نهاده‌های آلی، وارد کردن گونه‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در تناوب زراعی و تلقیح با ریزموجودات همزیست باکتریایی و قارچی با زعفران نقش بسزایی در تخفیف اثرات تغییر اقلیم و بهبود حاصلخیزی خاک از طریق بهبود کارایی مصرف آب این محصول ایفا می‌کند (Khorramdel et al., 2021). اجرای سیستم‌های زراعی چندکشتی و وارد کردن گونه‌های زراعی تثبیت‌کننده نیتروژن در تناوب زراعی از دیگر راهکارهای مؤثر در کاهش ردپای کربن معرفی شده که علاوه بر کاهش ردپای کربن، موجب بهبود کارایی مصرف نیتروژن در مقایسه با سیستم‌های تک‌کشتی می‌شود (Khorramdel et al., 2021). در این راستا، اجرای نظام‌های کشاورزی حفاظتی با مصرف کمتر سوخت‌های فسیلی و افزایش محتوی ماده آلی خاک، نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی را نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Khorramdel et al., 2021). همچنین، تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه با توجه به خصوصیات شیمیایی خاک، علاوه بر بهبود کارایی مصرف نهاده‌ها، مزایای زیست‌محیطی بسیاری را برای این محصول نیز به همراه دارد (Charles et al., 2006). نتایج پژوهش خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2015) نشان داد که محلول‌پاشی برگ زعفران با غلظت‌های مختلف دلفارد (حاوی عناصر غذایی ضروری) باعث بهبود وزن، قطر و تعداد بنه‌های دختری شد. نتایج دیگر مطالعات روی استفاده از سایر روش‌های بوم‌سازگار به‌ویژه کاربرد اسید هیومیک و تلقیح میکوریزا نشان داد که به دلیل بهبود باروری خاک، تحمل زعفران به تنش خشکی افزایش می‌یابد (Shajari et al., 2016; Noori et al., 2023). اسید هیومیک به‌عنوان نوعی اسید آلی، ساختار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود می‌بخشد و به دلیل ترکیبات هورمونی، اثرات مفیدی بر شاخص‌های کمی و کیفی زعفران دارد (Shajari et al., 2018, 2022).

علاوه بر این، اسید هیومیک با افزایش جذب عناصر ضروری و بهبود حاصلخیزی خاک، در نهایت، عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد (Koocheki et al., 2014a). خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2022) طی فراتحلیل تأثیر حاصلخیزکننده‌های مختلف (چون کود زیستی، کمپوست، اسید هیومیک، کود دامی، کود شیمیایی و تلفیقی) بر شاخص‌های مختلف عملکرد گل و بنه زعفران نتیجه گرفتند اگرچه مصرف کلیه کودها موجب بهبود رشد و عملکرد گل شد، ولی کودهای آلی و زیستی بیشترین تأثیر را در افزایش صفات رشدی و عملکرد داشت. همچنین مصرف حاصلخیزکننده‌های آلی همچنین با بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌تواند علاوه بر عملکرد، سایر خدمات و کارکردهای مزارع زعفران را نیز بهبود بخشد (Khorramdel et al., 2018a).

قارچ‌های میکوریزا با همزیستی با زعفران از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش توانایی ریشه در جذب آب، تولید هورمون‌های گیاهی، افزایش مقاومت در برابر عوامل بیماری‌زا و تقویت جامعه میکروبی وضعیت تغذیه گیاه را بهبود بخشیده است و تحمل به تنش‌های محیطی به‌ویژه تنش خشکی را افزایش می‌دهند (Shajari et al., 2016; Noori et al., 2023). تشکیل روابط میکوریزایی همچنین می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلف چون سوپراکسیداز، پراکسیداز و کاتالاز را در گیاه میزبان افزایش داده و میزان مالون‌دی‌آلدئید و هدایت الکتریکی غشای پلاسمایی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Husaini, 2014). در این راستا، طی مطالعه‌ای گزارش شد که تلقیح با میکوریزا موجب بهبود رشد و عملکرد بنه‌های دختری و در نتیجه افزایش عملکرد گل و کلالة زعفران شد (Noori et al., 2023).

دیگر روابط همزیستی بین گیاهان و سایر میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه باکتری‌های ریزوبیا، سودوموناس و باسیلوس پتانسیل امیدوارکننده‌ای برای افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده نیز محسوب می‌شود. ریزوباکتری‌های محرک رشد^۱ گیاه از طریق تولید هورمون‌های گیاهی نظیر ایندول استیک اسید (Husaini, 2014)، تولید سیدروفورها برای جذب آهن، فعال‌سازی انحلال فسفات‌های نامحلول، افزایش جذب عناصر غذایی و مهار عوامل بیماری‌زا نقش کلیدی در ارتقای رشد و نمو گیاهان ایفا می‌کنند و از این طریق، بر رشد و نمو و فیزیولوژی گیاه میزبان تأثیر می‌گذارند (Backer et al., 2018). باکتری‌های حل‌کننده فسفات^۲ نیز با ترشح اسیدهای آلی و برخی آنزیم‌ها، فسفر را از ترکیبات نامحلول آزاد کرده و در دسترس گیاه قرار می‌دهند (Backer et al., 2018). در این راستا، بررسی‌ها نشان داده است که تلقیح بنه‌های زعفران با *P. koreensis* WRF6 موجب بهبود مقاومت گیاه در برابر اثرات نامطلوب افزایش دما شد (Husaini, 2014).

بر اساس نتایج مطالعه کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2022)، با افزایش سن مزرعه به دلایل مختلفی از جمله نزدیک‌تر شدن بنه‌های دختری به سطح خاک، تغییر در خصوصیات شیمیایی خاک و افزایش رقابت بین بنه‌های دختری به دلیل افزایش

1- Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR)
2- Phosphate solubilizing bacteria (PSB)

تراکم، کاهش عملکرد گل و بنه‌های دختری مشاهده می‌گردد. بنابراین، باتوجه به شرایط تغییر اقلیم و کاهش عملکرد ناشی از این تغییرات چون افزایش دما، توصیه می‌شود که به دلایل مختلف چون نزدیک شدن بنه‌های دختری به سطح خاک، سن مزرعه کاهش داده شود تا سطح عملکرد حفظ شود. علاوه بر این، به دلیل وقوع تنش‌های مختلف دمایی (اعم از گرما و سرما)، پیشنهاد می‌شود که عمق مناسب در هنگام کاشت با توجه به شرایط اقلیمی منطقه به دقت انتخاب شود.

افزایش ذخیره کربن در بافت‌های گیاهی در طول فصل رشد و حفظ و برگشت بقایای گیاهی به خاک، ویژگی‌های فیزیکی (مانند ساختار، سرعت نفوذ آب و حفظ رطوبت)، شیمیایی (نظیر چرخه عناصر غذایی، ظرفیت تبادل کاتیونی و شاخص واکنش خاک) و فرآیندهای بیولوژیکی خاک (شامل ترسیب کربن، زیست توده میکروبی و افزایش تنوع زیستی خاک) را در بوم‌نظام‌های زراعی زعفران بهبود می‌بخشد (Khorramdel et al., 2021). علاوه بر این، ترسیب و ذخیره کربن در خاک به کاهش غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر و کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک شایانی می‌کند. کاشت گیاهانی با قابلیت ترسیب کربن هم‌زمان از طریق به‌کارگیری راهکارهای به‌زراعی جهت افزایش کارایی مصرف نیتروژن در نظام‌های کشاورزی می‌تواند در کاهش ردپای کربن مؤثر واقع شود (Khorramdel et al., 2021). در این راستا، مطالعات نشان داده است که کشت زعفران می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل ترسیب کربن در خاک شود (Khorramdel et al., 2013) و افزایش ظرفیت ترسیب کربن از طریق شیوه‌های اکولوژیک می‌تواند مزایای مستقیم زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی و در نتیجه بهبود وضعیت معیشتی و امنیت غذایی را برای کشاورزان به همراه داشته باشد (Khorramdel et al., 2021; Khorramdel et al., 2018a; Husaini, 2014; Alizadeh et al., 2020).

اثرات مثبت کشت مخلوط زعفران با سایر گیاهان زراعی و دارویی به‌عنوان یکی دیگر از راهبردهای مؤثر در کاهش پیامدهای منفی تغییرات اقلیم در مطالعات مختلف گزارش شده است. در این راستا، کشت مخلوط زعفران با برخی گونه‌های گیاهی مانند نخود (*Cicer arietinum* L.) (Asadi et al., 2016)، عدس (*Vicia lens* L.) (Koocheki et al., 2009a)، زنیان (*Trachyspermum ammi* L.) (Koocheki et al., 2009a)، سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) (Koocheki et al., 2009a)، خاکشیر (*Descurainia spohia* L.) (Koocheki et al., 2009a)، زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Koocheki et al., 2009a)، مرزنجوش (*Origanum majorana* L.) (Koocheki et al., 2013)، شبدر ایرانی (*Trifolium resupinatum* L.) (Koocheki et al., 2016)، خلر (*Lathyrus acutifolius* L.) (Koocheki et al., 2016)، پنیرک (*Malva sylvestris* L.) (Khorramdel et al., 2020a)، هندوانه (*Citrullus lanatus* L.) و کدو (*Cucurbita pepo* L.) (Koocheki et al., 2019) و بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) (Naderi Darbaghshahi et al., 2009) بر عملکرد گل و بنه‌های دختری مؤثر و مثبت گزارش شده است.

مطالعات نشان می‌دهد که اجرای تناوب کشت در مزارع زعفران به‌ویژه با غلات و حبوبات می‌تواند به بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد کمک شایانی کند. بنا بر توصیه برخی زعفران‌کاران پیشرو باید بعد از کشت متناوب (به مدت حداقل ۴ تا ۵

سال) (به عنوان مثال، در تناوب با گندم، جو، دانه های روغنی، گندم و مجدداً کشت زعفران)، آیش اعمال شود. همچنین کاربرد مالچ و بقایای گیاهی (Harivandi et al., 2019) و کاشت همزمان گیاهان پوششی خانواده حبوبات در طول دوره رشد رویشی زعفران به افزایش محتوی ماده آلی خاک، تثبیت نیتروژن، کاهش فرسایش خاک و کنترل علف های هرز منجر شده و مصرف کودهای شیمیایی، تبعات زیست محیطی و پیامدهای اقلیمی حاصل از مصرف نهاده های رایج را به حداقل می رساند (Khorramdel et al., 2020a). بررسی ها نشان داده است که کاشت گیاهان پوششی از طریق آزادسازی عناصر غذایی و فراهمی نیتروژن تحت تأثیر کاشت گونه های تثبیت کننده نیتروژن و ارتقاء خصوصیات خاک منجر به بهبود شرایط برای رشد بنه های دختری و عملکرد زعفران شد (Shabahang et al., 2013). علاوه بر این، مشاهدات میدانی نویسنده نیز موید این مطلب است که برداشت و حذف علف های هرز و قرارگیری آن ها در سطح خاک علاوه بر بهبود ماده آلی خاک می تواند تأثیر بسزایی در کنترل تغییرات دمایی خاک به ویژه در تابستان و افزایش عملکرد به دنبال داشته باشد.

در مناطق خشک و نیمه خشک، مدیریت بهینه منابع آبی از جمله چالش های اصلی کشاورزی است. در این راستا، بهره گیری از فناوری های نوین بوم سازگار همچون استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب به عنوان یکی دیگر از راهکارهای اکولوژیکی مؤثر در بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد زعفران مطرح شده است (Khorramdel et al., 2018b; Fallahi & Mahmmodi, 2018). پلیمرهای سوپرجاذب شبکه هایی آب دوست هستند که مقادیر زیادی آب را جذب و حفظ می نمایند. این پلیمرها به طور مناسب بر میزان نفوذ، تراکم، ساختار، فشردگی و بافت خاک و پایداری خاکدانه ها و سرعت تبخیر تأثیر می گذارند (Shajari et al., 2022). شجری و همکاران (Shajari et al., 2022) نشان دادند که کاربرد همزمان سوپرجاذب و اسید هیومیک در شرایط کم آبیاری می تواند افزایش تحمل زعفران به خشکی و کارایی مصرف آب را افزایش داده و در نتیجه کیفیت و عملکرد کلالة را بهبود بخشد.

تغییرات اقلیمی بر پراکنش آفات و بیماری های گیاهی نیز تأثیر گذاشته و خسارات قابل توجهی به محصولات کشاورزی و همچنین زعفران وارد می کند. در این راستا، بازوبندی و همکاران (Bazoobandi et al., 2020) برای پیشگیری و کنترل کنه در مزارع زعفران ناشی از تغییرات اقلیمی، کاشت در زمین های حاصلخیز، غنی از عناصر غذایی و ماده آلی دارای بافت خاک سبک و کوددهی با کود دامی (کود گاوی) عاری از بذر علف های هرز و آفتاب دهی به مدت ۳۰ روز در ابتدای تابستان را توصیه کردند. این محققان همچنین پیشنهاد نمودند که بنه های مورد استفاده برای کاشت بهتر است از خاک خشک، جداسازی شده و پس از آن، بنه های سالم را غربال و انتخاب و قبل از کاشت ضد عفونی نمود. البته برخی تحقیقات نیز مؤید آن است که افزایش ساپونین ها و فنولیک های موجود در بنه زعفران نیز می تواند به مهار قارچ های بیماری زای القا کننده پوسیدگی بنه در این گیاه مانند *Rhizopus nigricans* و *P. raistriicki*, *F. oxysporum*, *Bipolaris spicifera* *Aspergillus niger* کمک کند (Shahnaz et al., 2024).

نتیجه‌گیری کلی

تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد گل، کلاله و بنه و خصوصیات کیفی زعفران دارد. در این راستا، بررسی‌ها مؤید آن است که پارامترهای اقلیمی شامل بارندگی و به ویژه دما، مراحل مختلف رشد زعفران را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ به طوری که وقوع تغییرات اقلیمی به ویژه طی سال‌های اخیر منجر به کاهش عملکرد و کیفیت این محصول ارزشمند شده است. به طور کلی، بسته به هدف تولید، سه دوره بحرانی حساس در گیاه زعفران نسبت به پارامترهای اقلیمی شامل حداکثر تخصیص مواد فتوسنتزی به بنه‌های دختری (در ماه‌های اسفند و فروردین)، القای گلدهی (در تابستان) و ظهور گل (از اواخر تابستان تا آبان) معرفی شده است که افزایش دما به بالاتر از حد بهینه در این دوره‌ها، عملکرد را به شدت کاهش می‌دهد. دو مرحله خواب حقیقی و ظاهری از این نظر بسیار حیاتی به شمار می‌روند. دامنه دمایی بهینه برای وقوع خواب حقیقی (مرحله القای گلدهی) برابر با ۲۵-۲۳ درجه سانتی‌گراد و برای خواب ظاهری (مرحله ظهور گل) برابر با ۱۷-۱۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. حداکثر دمای قابل تحمل در مرحله القای گلدهی و ظهور گل زعفران به ترتیب ۳۰ و ۲۳ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است و افزایش دما در طی دوره گلدهی به دلیل تأخیر در وقوع این مرحله و همچنین کاهش مدت زمان آن، موجب افت چشمگیر عملکرد گل می‌شود.

بر این اساس، برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و حفظ پایداری تولید زعفران، اتخاذ رویکردهای مدیریتی و زراعی ضروری است. در این راستا، فشرده‌سازی پایدار و اکولوژیک سیستم‌های زراعی از طریق بهبود کارایی مصرف عناصر غذایی و جایگزینی کودهای شیمیایی با نهاده‌های بوم‌سازگار شامل بهره‌گیری از کودهای دامی و آلی، وارد کردن گونه‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در تناوب زراعی، تلقیح با میکوریزا و سایر میکروارگانیسم‌ها همچون باکتری‌های محرک رشد، کشت مخلوط، کاشت گیاهان پوششی، کاربرد سوپرجاذب، هورمون‌های گیاهی و اسید هیومیک از جمله راهکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی پیشرو پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به اهمیت مدیریت زراعی در کاهش اثر تغییرات اقلیمی بر عملکرد زعفران توصیه می‌شود که به منظور بهبود ماده‌آلی خاک و کنترل دما در تابستان، کاربرد مالچ و کاشت گیاهان پوششی و مدیریت پایدار علف‌های هرز از طریق حذف و قرار دادن بقایای آنها بر سطح خاک مدنظر قرار گیرد. محلول‌پاشی عناصر غذایی و مدیریت مناسب آبیاری، کشت بنه‌هایی با وزن بهینه و تراکم مطلوب، عمق مناسب کاشت و سن و جابجایی و انتقال مزارع به اقلیم‌های خنک‌تر نیز به دلیل تأثیر مستقیم بر عملکرد گل و بنه و کیفیت نیز می‌تواند در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم مؤثر واقع شود.

منابع

Abolhassani, L., Khorramdel, S., Reed, M., & Saghaian, S. (2020). Environmental economic analysis of saffron production. In *Saffron* (pp. 367–390). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818638-1.00023-X>

- Ahrazem, O., Rubio-Moraga, A., Castillo-López, R., Trapero-Mozos, A., & Gómez-Gómez, L. (2010). *Crocus sativus* pathogens and defence responses. *Functional Plant Science and Biotechnology, Global Science Book*, 81–90.
- Ali, G., Nehvi, F. A., Arshid, A., Naseer, S., Nagoo, S. A., Dar, N. A., & Iqbal, A. M. (2018). Effect of colchicine and corm weight on daughter corm formation in saffron (*Crocus sativus* L.). *ISHS Acta Horticulturae 1200: IV International Symposium on Saffron Biology and Technology*, 153–158. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1200.25>
- Alizadeh, H., Salarzahi, H., & Pouranjenar, G. B. (2020). Identification and prioritization of development strategies for entrepreneurial and commercialization of saffron in rural areas of South Khorasan. *Saffron Agronomy and Technology*, 8(4), 575–597. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2020.212516.1375>
- Aminifard, M. H., & Amiri, M. B. (2021). Growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.) affected by different levels of fulvic acid and cow manure in the second growing season. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 4(Special Issue-Recent Advances in Saffron), 57–68. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2021.4039.1191>
- Asadi, G. A., Khorramdel, S., & Hatefi Farajian, M. H. (2016). The effects of row intercropping ratios of chickpea and saffron on their quantitative characteristics and yield. *Saffron Agronomy and Technology*, 4(2), 93–103. <https://doi.org/10.22048/jsat.2016.17360>
- Aytekin, A., & Acikgoz, A. O. (2008). Hormone and microorganism treatments in the cultivation of saffron (*Crocus sativus* L.) plants. *Molecules*, 13(5), 1135–1146. <https://doi.org/10.3390/molecules13051135>
- Azari, S. J., Sorooshzadeh, A., Nabati, J., & Oskoueian, E. (2023). Relationship between fertilization and planting depths on antioxidant activity in saffron (*Crocus sativus* L.). *Industrial Crops and Products*, 191, 116004. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116004>
- Azizi-Zohan, A., Kamgar-Haghighi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2008). Crop and pan coefficients for saffron in a semi-arid region of Iran. *Journal of Arid Environments*, 72(3), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.001>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Banhang, F. M., Moghaddam, P. R., Asadi, G. A., & Khorramdel, S. (2021). Do corm seeding rate and planting depth influence growth indicators of saffron (*Crocus sativus* L.)? *Industrial Crops and Products*, 174, 114145. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114145>
- Bazobandi, M., Rahimi, H., & Karimi-Shahri, M.-R. (2020). Saffron crop protection. In *Saffron* (pp. 181–200). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818638-1.00010-1>
- Behdani, M. A., & Fallahi, H. R. (2015). *Saffron: Technical knowledge based on research approaches*. University of Birjand Publication. (In Persian).
- Bicharanlou, B., Koocheki, A., Bagheri, M., & Asadi, G. A. (2017). Feasibility of saffron cultivation in northern area of Khorasan province. *ISHS Acta Horticulturae 1184: V International Symposium on Saffron Biology and Technology*, 293–300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1184.42>
- Charles, R., Joliet, O., Gaillard, G., & Pellet, D. (2006). Environmental analysis of intensity level in wheat crop production using life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(2), 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.016>
- Chourak, Y., Belarbi, E. H., Martínez-Rivera, E. Y., da Cunha-Chiamolera, T. P. L., Peña-Fernández, A. A., Guill-Guerrero, J. L., & Urrestarazu, M. (2021). Fertigation temperature adjustment enhances the yield and quality of saffron grown in a soilless culture system. *HortScience*, 56(10), 1191–1194. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16005-21>
- Dastranj, M., Sepaskhah, A. R., & Kamgar-Haghighi, A. A. (2019). Rainfall and its distribution influences on rain-fed saffron yield and economic analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 3139–3147. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02804-0>
- Douglas, M. H., Smallfield, B. M., Wallace, A. R., & McGimpsey, J. A. (2014). Saffron (*Crocus sativus* L.): The effect of mother corm size on progeny multiplication, flower and stigma production. *Scientia Horticulturae*, 166, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.007>
- Fallahi, H. R., & Mahmoodi, S. (2018). Influence of organic and chemical fertilization on growth and flowering of saffron under two irrigation regimes. *Saffron Agronomy and Technology*, 6(2), 147–166. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2017.71511.1207>
- FAO. (2024). *FAO, Iran sign new project to enhance saffron authenticity*. <https://www.fao.org/iran/news/detail-events/en/c/1681772/>
- Farrokhi, H., Asgharzadeh, A., & Samadi, M. K. (2021). Yield and qualitative and biochemical characteristics of saffron (*Crocus sativus* L.) cultivated in different soil, water, and climate conditions. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2, 43–55. <https://doi.org/10.36253/ijam-1324>

- Ghorbani, R., & Koocheki, A. (2017). Sustainable cultivation of saffron in Iran. *Sustainable Agriculture Reviews*, 25, 169–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58679-3_6
- Golmohammadi, F. (2014). Saffron and its farming, economic importance, export, medicinal characteristics and various uses in South Khorasan Province-East of Iran. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 3(5), 566–596.
- Gresta, F., Napoli, E., Ceravolo, G., Santonoceto, C., Strano, T., & Ruberto, G. (2017). Stigmas yield and volatile compounds of saffron (*Crocus sativus*) in a late sowing under greenhouse with two nitrogen rates. *ISHS Acta Horticulturae 1184: V International Symposium on Saffron Biology and Technology*, 293–300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1184.42>
- Hasanuzzaman, M., Anee, T. I., Bhuiyan, T. F., Nahar, K., & Fujita, M. (2019). Emerging role of osmolytes in enhancing abiotic stress tolerance in rice. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* (pp. 677–708). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00033-2>
- Hosseini, M., Mollafilabi, A., & Nassiri, M. (2008). Spatial and temporal patterns in saffron (*Crocus sativus* L.) yield of Khorasan province and their relationship with long-term weather variation. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 79–88. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1178>
- Hrivandi, M. R., Rezvani Moghaddam, P., Khoramdel, S., & Moayedi, A. A. (2019). Effect of amount and time of wheat straw application as mulch on flowering and morphological characteristics of replacement corms of saffron (*Crocus sativus* L.). *Saffron Agronomy & Technology*, 7(3), 301–318. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/20.1001.1.23831529.1398.7.3.2.9>
- Husaini, A. M. (2014). Challenges of climate change: Omics-based biology of saffron plants and organic agricultural biotechnology for sustainable saffron production. *GM Crops & Food*, 5(2), 97–105. <https://doi.org/10.4161/gmcr.29436>
- Jose-Santhi, J., Sheikh, F. R., Kalia, D., & Singh, R. K. (2023). Sugar metabolism mediates temperature-dependent flowering induction in saffron (*Crocus sativus* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 206, 105150. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105150>
- Kafi, M., Koocheki, A., Rashed-Mohassel, M. H., & Nassiri, M. (2006). *Saffron: Production and processing*. Science Publishers.
- Khajeh-Hosseini, M., & Fallahpour, F. (2020). Emerging innovation in saffron production. In *Saffron* (pp. 205–216). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818638-1.00012-5>
- Khorramdel, S. (2024). The effect of climate change and agro-ecological zoning on quality of saffron in Iran. *Webinars Series on Sustainability of Crocus sativus L. Cultivation in the World in the Era of Climatic Change*. Ferdowsi University of Mashhad & Aristotle University of Thessaloniki.
- Khorramdel, S., Eskandari, S., & Mahmoodi, G. (2015). Evaluation of mother corm weights and foliar fertilizer levels on saffron (*Crocus sativus* L.) growth and yield components. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 2, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2015.01.002>
- Khorramdel, S., Koocheki, A., Mahallati, M. N., Khorasani, R., & Ghorbani, R. (2013). Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. *Soil and Tillage Research*, 133, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.009>
- Khorramdel, S., Moallem Banhangi, F., & Davarpanah, S. (2020a). Effect of intercropping patterns with mallow on replacement corms and flower yield and qualitative criteria of saffron in the third year. *Saffron Agronomy and Technology*, 8(4), 479–495. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2020.210799.1371>
- Khorramdel, S., Mokhtari, M., & Latifi, H. (2022a). The impact of various soil fertilizers on yield and growth criteria of saffron: A meta-analysis of field studies. *Saffron Agronomy and Technology*, 10(2), 129–147. <https://doi.org/10.22048/jsat.2022.323216.1449>
- Khorramdel, S., Mollafilabi, A., & Latifi, H. (2018b). Evaluating the potential of carbon sequestration and global warming potential for saffron fields (Case study: Khorasan-e Razavi Province). *Journal of Plant Production Research*, 25(1), 13–29. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jopp.2018.13027.2172>
- Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Latifi, H., & Farzaneh Belgerdi, M. (2020b). Comparison between energy, environmental and economical indicators of irrigated wheat and saffron agroecosystems in Khorasan-e Razavi Province. *Journal of Saffron Research*, 8(1), 29–54. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22077/jsr.2020.2892.1116>
- Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Moallem Banhangi, F., & Mollafilabi, A. (2019). Evaluation of environmental impacts of saffron (*Crocus sativus* L.) agroecosystems in the Khorasan province affected as field size by using life cycle assessment. *Saffron Agronomy and Technology*, 7(2), 207–225. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2018.129172.1296>
- Khorramdel, S., Nassiri Mahallati, M., Soltan Ahmadi, A., Hooshmand, M., & Mostafavi, M. J. (2021). Evaluation of carbon footprint for saffron production systems in Khorasan Provinces. *Saffron Agronomy and Technology*, 9(3), 249–267. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2021.255436.1413>

- Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., & Amin Ghafori, A. (2018a). Economic evaluation of agroecosystem services of saffron in Khorasan Razavi province. *Saffron Agronomy and Technology*, 6(1), 73–89. (In Persian). <https://doi.org/10.22048/jsat.2017.59190.1183>
- Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., & Moallem, F. (2022b). Effect of agronomic management on flower and daughter yield of saffron (*Crocus sativus* L.) on-farm trials. *Saffron Agronomy and Technology*, 10(1), 169–182. <https://doi.org/10.22077/JSR.2022.4866.1174>
- Khorramdel, S., Rezvani Moghaddam, P., Asadi, G. A., & Mirshekari, A. (2016). Effect of additive intercropping series of cumin (*Cuminum cyminum* L.) with saffron (*Crocus sativus* L.) on their yield and yield components. *Journal of Saffron Research*, 4(1), 53–71. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22077/jsr.2016.393>
- Koocheki, A. (2018). Agro-ecological aspects of saffron production with a holistic approach. *Proceedings of the Fifth National Conference on Saffron*. Torbat-Heydarieh, Iran. (In Persian with English Summary).
- Koocheki, A. (2024). Saffron: Yesterday, now and days ahead. *Webinars Series on Sustainability of Crocus sativus L. Cultivation in the World in the Era of Climatic Change*. Ferdowsi University of Mashhad & Aristotle University of Thessaloniki.
- Koocheki, A. R., Nassiri, M., Alizadeh, A., & Ganjali, A. (2009a). Modelling the impact of climate change on flowering behaviour of saffron (*Crocus sativus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7(2), 583–594. <https://doi.org/10.22067/gsc.v7i2.7530>
- Koocheki, A. R., Rezvani Moghaddam, P., & Seyyedi, S. M. (2019). Saffron-pumpkin/watermelon: A clean and sustainable strategy for increasing economic land equivalent ratio under limited irrigation. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1327–1338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.209>
- Koocheki, A., & Khajeh-Hosseini, M. (Eds.). (2020). *Saffron: Science, technology and health*. Woodhead Publishing.
- Koocheki, A., & Nasiri Mahalati, M. (2008). Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 139–154. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1185>
- Koocheki, A., & Seyyedi, S. M. (2016). Effects of different water supply and corm planting density on crocin, picrocrocin and safranal, nitrogen uptake and water use efficiency of saffron grown in semi-arid region. *Notulae Scientia Biologicae*, 8(3), 334–341. <https://doi.org/10.15835/nsb839855>
- Koocheki, A., & Seyyedi, S. M. (2019). Mother corm origin and planting depth affect physiological responses in saffron (*Crocus sativus* L.) under controlled freezing conditions. *Industrial Crops and Products*, 138, 111468. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111468>
- Koocheki, A., Alizadeh, A., & Ganjeali, A. (2010). The effect of increased temperature on flowering behaviour of saffron (*Crocus sativus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 8(2), 324–335. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/gsc.v8i2.7530>
- Koocheki, A., Asadi, G. A., Bagheri Shirvan, M., & Bicharanlou, B. (2018). The possibility of replacing chemical fertilizer with organic manure in saffron cultivation at different levels of corm density under Northern Khorasan climatic conditions. *Saffron Agronomy and Technology*, 6(2), 125–145. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2017.75396.1214>
- Koocheki, A., Azizi, E., Siahmarguee, A., & Jahani Kondori, M. (2014). Investigation the effects of soil texture and density on corm characteristics and flower yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Agroecology*, 6(3), 453–466. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jag.v6i3.43409>
- Koocheki, A., Fallahi, H. R., Amiri, M. B., & Ehyaei, H. (2014a). Effects of humic acid application and mother corm weight on yield and growth of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Agroecology*, 7(4), 425–442. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jag.v7i4.53822>
- Koocheki, A., Karbasi, A., & Seyyedi, M. (2017). Some reasons for saffron yield loss over the last 30 years period. *Saffron Agronomy and Technology*, 5(2), 107–122. (In Persian). <https://doi.org/10.22048/jsat.2016.38669>
- Koocheki, A., Khorramdel, S., & Moallem Banhangi, F. (2022). Effect of corm harvesting year on agronomic criteria, daughter corm yield and flower yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Saffron Agronomy and Technology*, 10(2), 101–116. <https://doi.org/10.22048/jsat.2022.296998.1431>
- Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., & Fallahi, H. R. (2016). Effects of planting dates, irrigation management and cover crops on growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Agroecology*, 8(3), 435–451. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jag.v8i3.51323>
- Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., Fallahi, H. R., & Aghavani-Shajari, M. (2016a). The study of saffron (*Crocus sativus* L.) replacement corms growth in response to planting date, irrigation management and companion crops. *Saffron Agronomy and Technology*, 4(1), 3–18. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2016.11895>
- Koocheki, A., Seyyedi, S. M., & Eyni, M. J. (2014b). Irrigation levels and dense planting affect flower yield and phosphorus concentration of saffron corms under semi-arid region of Mashhad, Northeast Iran. *Scientia Horticulturae*, 180, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.031>

- Koocheki, A., Siahmarguee, A., Azizi, G., & Jahani Kondori, M. (2011). The effect of high density and depth of planting on agronomic characteristic of saffron (*Crocus sativus* L.) and corms behavior. *Journal of Agroecology*, 3(1), 36–49. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jag.v3i1.9969>
- Koocheki, A., Tabrizi, L., Jahani, M., Mohammad Abadi, A. A., & Mahdavi Damghani, A. M. (2009b). Performance of saffron (*Crocus sativus* L.) under different planting patterns and high corm density. *3rd International Symposium on Saffron Forthcoming Challenges in Cultivation Research and Economics*, 33–40.
- Kouzegaran, S., Mousavi Baygi, M., & Babaeian, I. (2021). Temperature extreme indices projection based on RCP scenarios in Northeast of Iran. *Water and Soil*, 34(6), 1351–1366. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i6.85845>
- 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 cultivation by incorporating the effect of extreme climate indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(3), 1109–1118. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03241-0>
- Kumar, L., Chhogyel, N., Gopalakrishnan, T., Hasan, M. K., Jayasinghe, S. L., Kariyawasam, C. S., Kogo, B. K., & Ratnayake, S. (2022). Climate change and future of agri-food production. In *Future Foods* (pp. 49–79). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00009-8>
- Kumar, R., Singh, V., Devi, K., Sharma, M., Singh, M. K., & Ahuja, P. S. (2008). State of art of saffron (*Crocus sativus* L.) agronomy: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 25(1), 44–85. <https://doi.org/10.1080/87559120802458503>
- Lopez-Corcoles, H., Brasa-Ramos, A., Montero-Garcia, F., Romero-Valverde, M., & Montero-Riquelme, F. (2015). Phenological growth stages of saffron plant (*Crocus sativus* L.) according to the BBCH Scale. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(3), e09SC01. <https://doi.org/10.5424/sjar/2015133-7340>
- Mahmudi, N., & Abghari, H. (2024). Investigating the effect of increasing cultivated area and population growth on surface water resources of Mahabad using WEAP model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.85119.1425>
- Moallem Banhangi, F. M., Moghaddam, P. R., Asadi, G. A., & Khorramdel, S. (2021). Do corm seeding rate and planting depth influence growth indicators of saffron (*Crocus sativus* L.)? *Industrial Crops and Products*, 174, 114145. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114145>
- Molina, R. V., García-Luis, A., Valero, M., Navarro, Y., & Guardiola, J. L. (2004). Extending the harvest period of saffron. *ISHS Acta Horticulturae 650: I International Symposium on Saffron Biology and Biotechnology*, 219–225. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.25>
- Molina, R. V., Valero, M., Navarro, Y., Guardiola, J. L., & Garcia-Luis, A. (2005). Temperature effects on flower formation in saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 103(3), 361–379. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.06.005>
- Mollafilabi, A., Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., & Nassiri Mahallati, M. (2017). Effects of bed type, corm weight and lifting time on quantitative and qualitative criteria of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Agroecology*, 9(3), 607–617. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jag.v9i3.26955>
- Mollafilabi, A., Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., & Nassiri Mahallati, M. (2014). Effect of plant density and corm weight on yield and yield components of saffron (*Crocus sativus* L.) under soil, hydroponic and plastic tunnel cultivation. *Saffron Agronomy & Technology*, 1(2), 14–28. (In Persian with English Summary). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23831529.1392.1.2.2.5>
- Moradi, S. (2024). Trends of the past and future impacts of climate change on saffron production in Iran. *Webinars Series on Sustainability of Crocus sativus L. Cultivation in the World in the Era of Climatic Change*. Ferdowsi University of Mashhad & Aristotle University of Thessaloniki.
- Naderi Darbaghshahi, M., Pazoki, A., Banitaba, A., & Jalali Zand, A. (2009). Study of agronomical and economical aspects of saffron and chamomile intercropping in Isfahan region. *New Findings in Agriculture*, 3(4), 413–422.
- Naghipour, P., Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., & Khorramdel, S. (2024). Evaluation of ecological resilience of agricultural ecosystems in Razavi Khorasan province: Comparison of integrated and non-integrated ecosystems. *Journal of Agroecology*, 16(3). (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/agry.2024.86287.1184>
- Nemati, Z., Harpke, D., Gemicioglu, A., Kerndorff, H., & Blattner, F. R. (2019). Saffron (*Crocus sativus*) is an autotriploid that evolved in Attica (Greece) from wild *Crocus cartwrightianus*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 136, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2019.03.022>
- Noori, A., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., & Khorramdel, S. (2023). Effects of mycorrhiza inoculation, mother corm weight and humic acid on daughter corm and flower yield of saffron. *Journal of Saffron Research*, 11(1), 48–65. <https://doi.org/10.22077/jsr.2023.5903.1203>
- Pirasteh-Anosheh, H., Babaie-Zarch, M. J., Nasrabadi, M., Parnian, A., Alavi-Siney, S. M., Beyrami, H., Kaveh, H., Hashemi, S. E., Durrer, U., & McDonald, K. (2023). Climate and management factors influence saffron

- yield in different environments. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(3), e20418. <https://doi.org/10.1002/agg2.20418>
- Rastegarpour, F., & Mohammadi, N. (2018). Investigation of factors affecting saffron market in Iran with emphasis on indigenous package and branding. *Saffron Research Journal*, 6(1), 51–51. (In Persian with English Summary).
- Rezvani Moghaddam, P., Khorramdel, S., & Farshchin, S. (2022). Comparison of environmental effects of conventional and low input saffron production systems in Razavi Khorasan by using the life cycle assessment methodology. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 20(1), 29–44. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.68449.1015>
- Sahabi, H., & Moallem Banhangi, F. (2021). Evaluation the impact climatic parameters on flowering behaviour and yield of saffron (*Crocus sativus* L.) in Razavi and Southern Khorasan Provinces. *Saffron Agronomy and Technology*, 9(4), 357–373. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2021.283088.1423>
- Salteh, S. A., & Amani, M. (2021). Evaluation of climate effect on saffron's metabolites (crocin, picrocrocin and safranal) in Bonab region of Marand. *Journal of Horticultural Science*, 35(4), 579–590. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.61978.0>
- Sanaei Nejad, S. H., Salari, K., & Khorramdel, S. (2024). Synoptic analysis of sudden drop in temperature and its effect on saffron yield in 2023. *Webinars Series on Sustainability of Crocus sativus L. Cultivation in the World in the Era of Climatic Change*. Ferdowsi University of Mashhad & Aristotle University of Thessaloniki.
- Shabahang, J., Khorramdel, S., Amin Ghafori, A., & Gheshm, R. (2013). Effects on management of crop residues and cover crop planting on density and population of weeds and agronomical characteristics of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Saffron Research*, 1(1), 57–72. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/jsr.2013.434>
- Shahnaz, E., Banday, S., Dar, Z. A., Lone, A. A., Habib, M., Nisa, S. U., Kumar, A., & Jhang, S. I. T. (2024). New and emerging trends in phytopathology of medicinally bioactive geographical indicator of Kashmir: Saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Medicinal and Aromatic Plant Sciences*, 46(1), 10–16. (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.62029/jmaps.v46i1>
- Shajari, M. A., Moghaddam, P. R., Ghorbani, R., & Koocheki, A. (2022). Does nutrient and irrigation managements alter the quality and yield of saffron (*Crocus sativus* L.)? *Agricultural Water Management*, 267, 107629. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107629>
- Shajari, M., Rezvani Moghaddam, P., Ghorbani, R., & Koocheki, A. (2018). Increasing saffron (*Crocus sativus* L.) corm size through the mycorrhizal inoculation, humic acid application and irrigation managements. *Journal of Plant Nutrition*, 41(8), 1047–1064. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1433835>
- Shajari, M., Rezvani Moghaddam, P., Ghorbani, R., & Nasiri Mahalati, M. (2016). Effects of single and combined application of organic, biological and chemical fertilizers on quantitative and qualitative yield of coriander (*Coriandrum sativum*). *Journal of Horticultural Science*, 29(4), 486–500. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v29i4.51510>
- Shokati, B., Asgharipour, M. R., Ghanbari, A., & Feizizadeh, B. (2016). Suitability assessment of saffron cultivation using GIS based multi-criteria decision analysis approach; study area: East-Azerbaijan province. *Desert*, 21(2), 115–131. <https://doi.org/10.22059/jdesert>
- Siracusa, L., Gresta, F., Avola, G., Lombardo, G. M., & Ruberto, G. (2010). Influence of corm provenance and environmental condition on yield and apocarotenoid profiles in saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(5), 394–400. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.02.007>
- Souret, F. F., & Weathers, P. J. (2000). The growth of saffron (*Crocus sativus* L.) in aeroponics and hydroponics. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 7(3), 25–35. https://doi.org/10.1300/J044v07n03_04
- Tan, Z. X., Lal, R., & Wiebe, K. D. (2005). Global soil nutrient depletion and yield reduction. *Journal of Sustainable Agriculture*, 26(1), 123–146. https://doi.org/10.1300/J064v26n01_10
- Zakiaghl, M., Khorramdel, S., Nabati, J., Koocheki, A., Nezami, A., Mirshamsi, A., Rezvani Moghaddam, P., & Nassiri Mahallati, M. (2020). Criteria for production of standard pathogen-free saffron corms. *Saffron Agronomy and Technology*. (In Press). (In Persian with English Summary). <https://doi.org/10.22048/jsat.2021.233278.1401>
- Zhang, H. S., & He, X. L. (2007). Effect of AM fungal on the protective system in leaves of *Artemisia ordosica* under drought stress. *Biotechnology Bulletin*, 3, 129–133.
- Ziaei, S. M., Khashei Siuki, A., Ahmadian, A., & Salarian, A. (2024). Reduction of drought stress effects on saffron (*Crocus sativus* L.) using phytohormones. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, in Press. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.365872.1697>