



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

Soroor Khorramdel^{1*} , Atefeh Mirzaeian²

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

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

*Corresponding author: khorramdel@um.ac.ir

Received: 22 March 2025; Revised: 25 May 2025, Accepted: 24 July 2025

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 saffron 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 intensification, Ecological niche, Flowering duration, Global warming, Intercropping.



نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)

جلد سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴

شماره صفحه: ۱۹۷-۱۷۳

doi 10.22077/jsr.2025.9147.1269

مقاله مروری

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

سرور خرم‌دل^{۱*} و عاطفه میرزائیان^۲

۱- دانشجویار گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول: khorramdel@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲

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 سوپرجاذب‌ها، 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 برگ‌ها و مدیریت سن مزرعه بوده که برای بهبود سازگاری و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی توصیه می‌شوند.

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



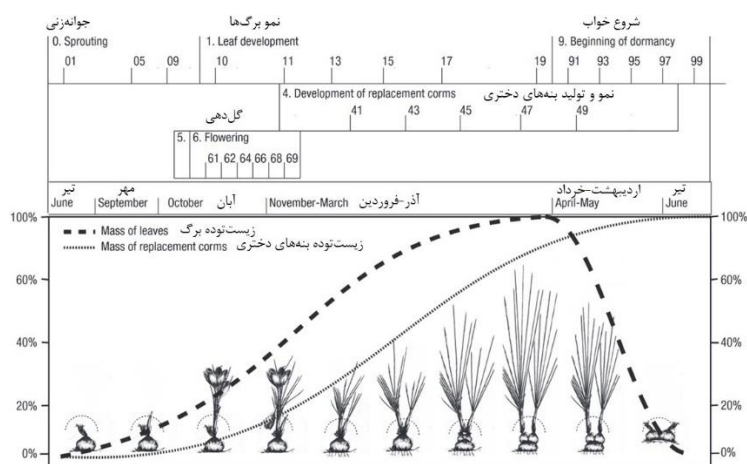
مقدمه

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) به‌خوبی رشد می‌کند (Bicharanlou, 2017) و از این‌رو، توسعه کشت این گیاه ارزشمند در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور از نظر اقتصادی و اجتماعی بسیار حائز اهمیت است (Behdani & Fallahi, 2015).

به‌طور 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 به‌ویژه دمای محیط بستگی دارد؛ به طوری‌که هر گونه افزایش یا کاهش دما، ویژگی‌های رشد و عملکرد کمی و کیفی آن‌را به‌شدت تحت‌تأثیر 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 هیچ‌گونه تغییر مورفولوژیکی و رشد ظاهری ندارند، ولی تغییرات فیزیولوژیکی و مورفونتیکی در آن‌ها رخ می‌دهد (Lopez- Corcoles et al., 2015).

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; Nemat 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 منحصربه‌فرد 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 به‌عنوان مهم‌ترین عامل محیطی مؤثر بر گلدهی، نقش



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)

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 $۵۴/۲۱ \times ۱۰^۶$ ، $۶۰/۲۴ \times ۱۰^۶$ ، $۴۷/۱ \times ۱۰^۶$ و $۳۱/۹۸ \times ۱۰^۶$ ریال در هکتار در سال برآورد نمودند.

زنان در مزارع زعفران به دلیل دانش و آگاهی زیست-محیطی 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 قابل توجهی 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

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 دختری 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 پایدار 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 آن را 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., 2019; Khilare et al., 2017).

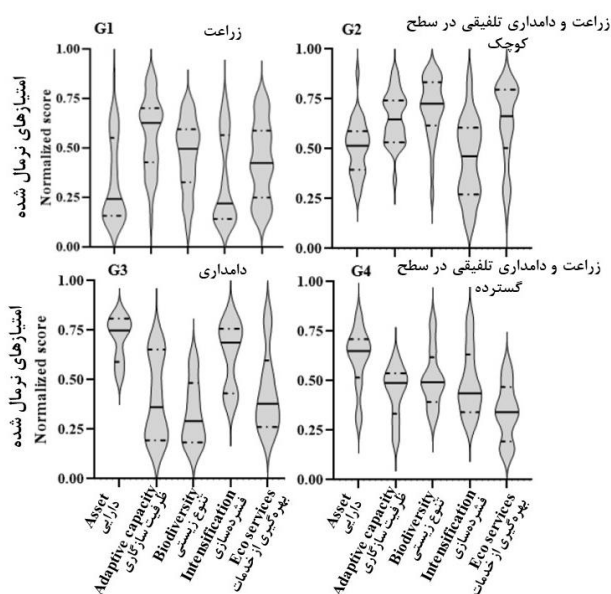
اقتصادی پایین‌تر زعفران نسبت به گندم، شاخص بوم‌شناخت آن بالاتر محاسبه شد؛ ضمن اینکه بررسی شاخص‌های اقتصادی این دو محصول نیز حاکی از ارزش اقتصادی بالاتر زعفران است که به نوعی عملکرد کمتر آن را جبران نموده و به دلیل تأثیر مثبت‌تر این محصول بر محیط‌زیست، از ارزش اکولوژیکی بالاتری نسبت به گندم برخوردار است. 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).

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 به عنوان 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 $10^{-6} \times 57/136$ 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



شکل ۲. توزیع فراوانی امتیاز نرمال شده مؤلفه‌های 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.

Fig 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.

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 کلاله، اجزای عملکرد و خصوصیات کیفی زعفران ایفا می‌کنند، با این وجود، 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).

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 تحت تأثیر 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

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)

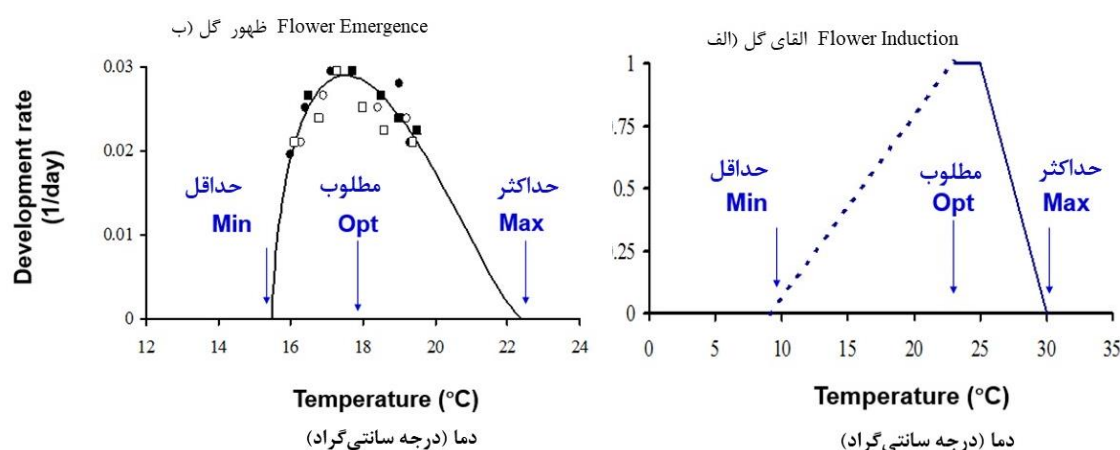
پارامتر Parameter	دما (درجه سانتی‌گراد) Temperature (°C)		
	23	25	27
طول اندام هوایی (میلی‌متر) Shoot apex length (mm)	16.9 a	8.8 b	6.3 c
مرحله گلدهی Flowering stage	8.9 a	8.0 b	7.0 c
تعداد روز تا مرحله گلدهی Days to flowering stage	123 a	128 b	141 c
تعداد گل در هر بنه Flowers number per corm	2.2	2.2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

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).

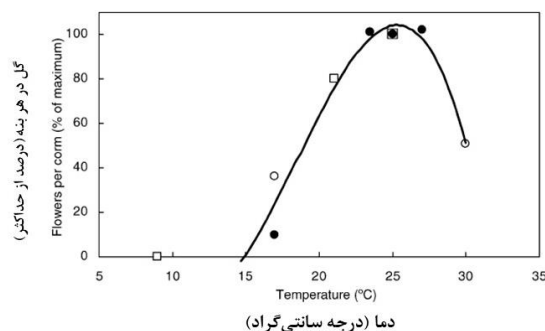
با توجه به مطالعات انجام شده دمای بهینه برای شکستن خواب و ظهور گل زعفران از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Ahrazem et al., 2010)، به طوری که برخی مطالعات نشان داده است گلدهی در بنه‌هایی که در مرحله اولیه کاشت بیش از ۵۰ روز در دمای ۲۳ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد و سپس در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند، رخ می‌دهد (Molina et al., 2004; 2005). طول دوره القای گلدهی در مطلوب‌ترین شرایط با دامنه دمایی بهینه برابر با ۲۳-۱۵ 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).

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 به ویژه 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 (مؤثر بر مرحله القای گل) تا آبان (مؤثر بر مرحله ظهور گل) به‌طور مستقیم بر القا، تحریک و ظهور گل در زعفران تأثیر می‌گذارد. کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2010) دامنه دمایی مطلوب برای القای گلدهی زعفران را ۲۵-۲۰ 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

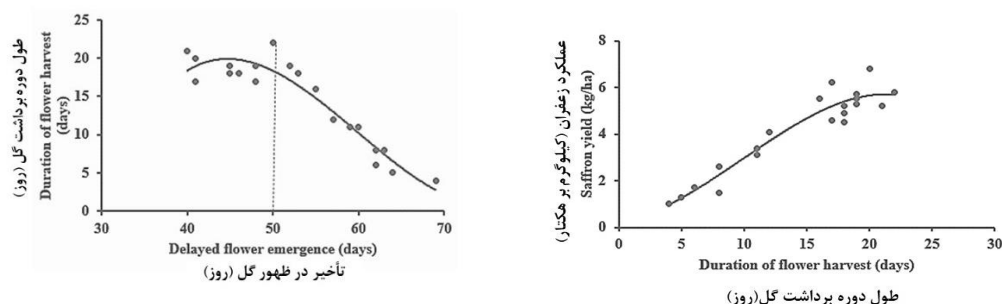


شکل ۳. دامنه دمایی کاردینال برای مراحل القای گلدهی (راست) و ظهور گل (چپ) در زعفران (Koocheki et al., 2010)
Fig 3. Cardinal temperature range for flower induction (right) and flower emergence (left) stages in saffron (Koocheki et al., 2010)



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

Fig 4. The effect of temperature 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)

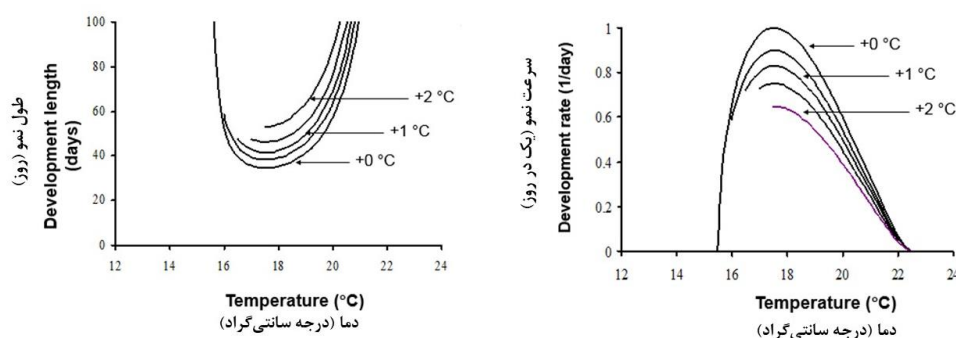
تسریع در طول دوره گلدهی و سرعت نمو موجب کوتاه‌تر شدن طول دوره گلدهی، کاهش تعداد گل و در نهایت، افت عملکرد زعفران می‌شود (Koocheki et al., 2010).

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 Banhangi, 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).

پس از مرحله القای گلدهی که معمولاً طی فصل تابستان تحت تأثیر دمای بالا صورت می‌گیرد، مرحله ظهور گل در پاییز با سرد شدن هوا آغاز می‌شود. گلدهی زود هنگام، می‌تواند پس از ۱۰۵ روز قرارگیری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سپس قرارگیری بنه‌ها در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد رخ دهد (Molina et al., 2005). در شرایط بهینه، این دوره حدود ۵۰ روز به طول می‌انجامد و دامنه دمایی مطلوب برای این مرحله رشدی در شرایط کنترل شده ۱۷-۱۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (شکل 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 می‌دهد (Koocheki, 2024) که این مسئله نشان‌دهنده 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، می‌توان راهبردهای بهتری را برای مدیریت توسعه کاشت زعفران همراه با افزایش عملکرد و کیفیت آن اتخاذ نمود. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش دما در مرحله القای گلدهی از طریق تأخیر در گلدهی،

۲۴ 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).

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, 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 ۵۶-



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)

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

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

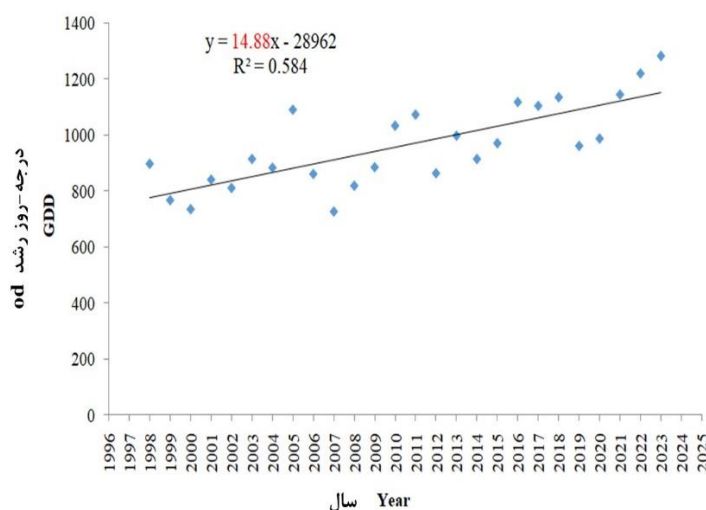
شهرستان City	متغیرهای پیش‌بینی Predictive variables	ضریب بتا β coefficient	ضریب t t coefficient	مقدار P P value	ضریب تبیین R square	ضریب تبیین اصلاح شده Adjusted R square	ضریب F F coefficient	درجه آزادی df	مقدار P P value
تربت‌حیدریه Torbat- heydariye	میانگین دما Average temperature (°C)	-0.651	-3.831	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

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 سرمای 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 (-0.7) و پیکروکروسین (-0.55) 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 0.6 محاسبه شده که نشان‌دهنده تأثیر بارندگی بر کیفیت زعفران است. همچنین همبستگی منفی و بالایی بین عملکرد کلالة، 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 محتوی متابولیت‌های ثانویه در زعفران دارد.

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).

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 تحت تأثیر این دو متغیر اقلیمی قرار گرفت (Hosseini et al., 2008). در این راستا، با توجه به پیش‌بینی افزایش میانگین دما (حدود $1.4-1.9$ 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). طی مطالعه‌ای 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).

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).



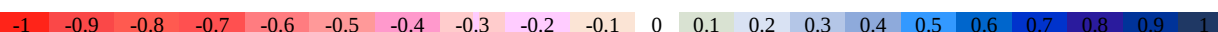
شکل ۷. روند تغییرات درجه-روز رشد زعفران طی سال‌های ۱۴۰۳-۱۳۷۵ در شهرستان تربت‌حیدریه (Moradi, 2024)

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

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)

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



همبستگی منفی زیاد

High negative correlation

بدون همبستگی

Non-correlation

همبستگی مثبت زیاد

High positive correlation

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 (میلی‌گرم 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 سانتی‌متر 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

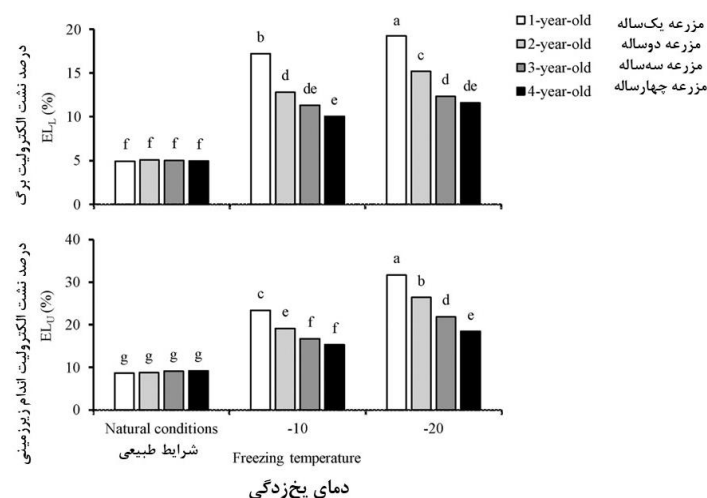
ns, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح ۵ و ۱ درصد

ns, * and ** indicate non-significance, significance at the 5% level, and significance at the 1% level, respectively.

برابر سرما، تجمع اسمولیت‌هایی مانند کربوهیدرات‌ها، پرولین و پروتئین‌های محلول بوده که مسئول تنظیم اسمزی تحت تنش هستند و از گیاهان در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی محافظت می‌کنند (Hasanuzzaman et al., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که وقوع یخبندان در طول دوره گلدهی و رشد بنه‌های دختری زعفران، می‌تواند منجر به مرگ گیاه شود (Salteh & Amani, 2021). همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کاهش دما در بنه‌های برداشت شده از مزارع زعفران با سنین مختلف، باعث افزایش نشت الکترولیت‌ها در برگ‌ها و اندام‌های زیرزمینی و تجمع پرولین شده و میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (Koocheki & Seyyedi, 2019). بر این اساس همان‌طور 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-Sanathi et al., 2023) و همچنین وقوع مرحله رویشی و وجود برگ‌های سبز در زمستان در گیاه زعفران، این گیاه را نسبت به بروز تنش‌های سرمای 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 سرمای شدید، دارای اثر منفی بر رشد و نمو زعفران بوده و عملکرد آن را به شدت کاهش می‌دهند (Azari et al., 2023).

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 می‌شود. همچنین دمای بالاتر از ۲۲ درجه سانتی‌گراد در پاییز، ظهور گل‌ها را متوقف می‌نماید. به ازای هر درجه افزایش دمای بالاتر از ۱۷ درجه سانتی‌گراد در این دوره رشدی، حدود ۱۴ روز به زمان ظهور گل افزوده می‌شود 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 می‌شوند؛ به طوری که قرارگیری این گیاه در معرض تنش یخ‌زدگی موجب بروز آسیب به اندام‌های هوایی و زیرزمینی این گیاه شده و در نتیجه عملکرد آن را کاهش می‌دهد؛ بنابراین از دمای پایین در فصل زمستان نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای محدودکننده رشد زعفران یاد می‌شود (Kafi et al., 2006; Koocheki & Seyyedi, 2019; Salteh & Amani, 2021; Azari et al., 2023; Jose-Sanathi et al., 2023; Sanaei Nejad et al., 2024). هنگامی که گیاهان در معرض تنش‌های دمایی پایین چون سرما و یخ‌زدگی قرار می‌گیرند، تغییرات فیزیولوژیکی مختلفی در گیاهان شامل تغییر در ترکیب چربی غشای سلولی، تغییر در غلظت پروتئین‌ها و متابولیت‌ها و همچنین فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی رخ می‌دهد (Azari et al., 2023). یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در

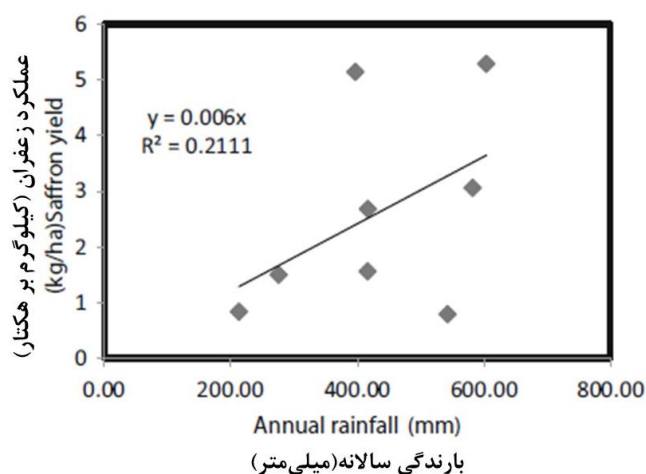


شکل ۸. اثر متقابل دمای یخ‌زدگی و سن مزرعه بر نشت الکترولیت در برگ (EL_L) و اندام زیرزمینی (EL_U) زعفران (Koocheki & Seyyedi, 2019)

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)

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. علاوه بر عوامل اقلیمی ذکر شده در فوق، گرمایش جهانی از طریق ذوب شدن یخ‌های قطبی باعث تغییر در گرادیان 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 دمایی 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 (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶)، 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).

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 کلالة زعفران تأثیرگذار است (Sahabi & Moallem Banhangi, 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، با توجه به نوسانات بالای عملکرد تحت تأثیر مقادیر بارندگی سالانه، به‌نظر می‌رسد که عملکرد به عوامل اقلیمی دیگری به‌ویژه دما به مراتب بیشتر از بارندگی وابسته می‌باشد. بر این اساس، کاهش قابل توجه تولید



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)

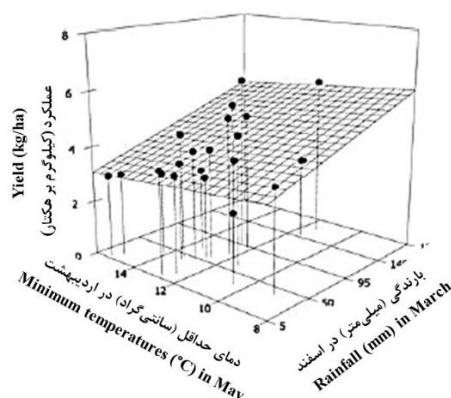
(بیش از ۵-۴ سال)، عملکرد گل و بنه‌های دختری کاهش می‌یابد. هر چند رابطه بین اندازه بنه و عملکرد زعفران در مطالعات مختلف بررسی شده است، اما اثر طول دوره تخصیص مواد فتوسنتزی و اندازه بنه بر عملکرد هنوز به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است و انجام مطالعات بیشتر در این زمینه می‌تواند به ارائه راهکارهای مدیریتی دقیق‌تر برای بهبود عملکرد مزارع زعفران به ویژه در شرایط تغییر اقلیم کمک کند.

مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی نیز نشان می‌دهند 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 استان‌های خراسان رضوی و جنوبی طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۷۷ مشخص شد که به‌طور میانگین، ۳۳ درصد از مجموع بارندگی کاسته و ۰/۵ درجه سانتی‌گراد بر میانگین دما افزوده شده است. نتایج رگرسیون بین عملکرد و پارامترهای اقلیمی نیز نشان‌دهنده کاهش هم‌زمان عملکرد با الگوهای افزایش دما و کاهش بارندگی است. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی نه‌تنها 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 بارندگی‌های پاییزی از طریق کاهش محتوی مواد مؤثره منجر به افت کیفیت زعفران می‌شود. در پژوهشی دیگر، حدود ۳۷ درصد از تغییرات عملکرد زعفران در منطقه تربت‌حیدریه 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 به‌طور 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.

وقوع سرمای بی‌سابقه در اسفند ماه سال ۱۴۰۱ نیز به‌عنوان یکی از تبعات تغییر اقلیم، بخش قابل‌توجهی از مزارع زعفران در استان خراسان رضوی را تحت تأثیر قرار داده و خسارات قابل‌توجهی به عملکرد گل این گیاه وارد نمود. اگرچه اطلاعات دقیقی در مورد سهم این سرمای بی‌سابقه بر عملکرد زعفران وجود ندارد، اما شواهد موجود حاکی از کاهش چشمگیر عملکرد در مناطق آسیب‌دیده نسبت به میانگین چند ساله است (Sanaei Nejad et al., 2024). گیاه زعفران به دلیل رشد رویشی و نیاز به حفظ سبزینه‌گی برگ‌ها در طول زمستان، حساسیت بالایی نسبت به سرما دارد؛ به‌طوری‌که وقوع سرمای شدید به بافت‌های گیاهی آسیب رسانده و منجر به کاهش تعداد گل و در نتیجه افت عملکرد می‌شود (Sanaei Nejad et al., 2024).

بنه زعفران به‌عنوان اندام ذخیره‌سازی، نقش مهمی در تولید گل و بنه‌های دختری ایفا می‌کند. از این‌رو، 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 بنه‌های دختری افزایش می‌یابد، افزایش دما هم‌زمان با مرحله حداکثر میزان تخصیص ماده خشک به بنه‌های دختری در ماه‌های اسفند و فروردین، پژمردگی سریع برگ‌ها (پایان دوره تخصیص مواد فتوسنتزی) را به دنبال داشته که منجر به کوچک‌تر شدن بنه‌های دختری و در نتیجه افت عملکرد گل می‌شود. نتایج مطالعه ملافیلابی و همکاران (Mollafilabi et al., 2014) نشان داد که کاشت بنه‌های بالاتر از ۱۰ گرم خصوصیات رشدی و عملکرد کلالة زعفران را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. بررسی‌ها نشان داده است که با افزایش وزن بنه، خصوصیات رشدی نظیر زمان لازم تا ظهور اندام هوایی، زیست توده، وزن خشک ریشه و تعداد جوانه‌های فعال افزایش می‌یابد (Koocheki et al., 2009b).

کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2022) گزارش نمودند که سن مزرعه زعفران بر عملکرد گل و بنه‌های دختری مؤثر است؛ به‌طوری‌که با افزایش سن مزرعه



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)

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 به ویژه 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) که در ادامه برخی از این موارد 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

راهکارهای زراعی و اگرواکولوژیکی 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 زیرکشت، 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

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., 2023; Noori et al., 2016). 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 قابل‌توجهی 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 کلاله 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 تراکم، کاهش عملکرد

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 برگ‌ی 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).

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، زیست‌توده 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 (Husaini, 2014; Alizadeh et al., 2020; Khorramdel et al., 2021; Khorramdel et al., 2018a).

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* L.) (Koocheki et al., 2009a)، سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) (Koocheki et al., 2009a)، خاکشیر (*Descurainia spohia* L.) (Koocheki et al., 2009a)، زیره‌سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Koocheki et al., 2009a; Khorramdel et al., 2016)، 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)، بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) (Naderi et al., 2009) (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) (به‌عنوان مثال، در تناوب با گندم، جو، دانه‌های 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 علف‌های هرز منجر شده و مصرف کودهای شیمیایی، تبعات زیست‌محیطی و پیامدهای اقلیمی حاصل از مصرف نهاده‌های رایج را به حداقل می‌رساند (Khorramdel et al., 2020a). بررسی‌ها نشان داده است که کاشت گیاهان پوششی از طریق آزادسازی عناصر غذایی و فراهمی نیتروژن تحت تأثیر کاشت گونه‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و ارتقاء خصوصیات خاک منجر به بهبود شرایط برای رشد بنه‌های دختری و عملکرد زعفران شد (Shabahang et al., 2013). علاوه بر این، مشاهدات میدانی نویسنده نیز موید این مطلب است که برداشت و حذف علف‌های هرز و قرارگیری آن‌ها در سطح خاک علاوه بر بهبود ماده آلی خاک می‌تواند تأثیر بسزایی در کنترل تغییرات دمایی خاک به ویژه در تابستان و افزایش عملکرد به دنبال داشته باشد.

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، زیست‌توده 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 (Husaini, 2014; Alizadeh et al., 2020; Khorramdel et al., 2021; Khorramdel et al., 2018a).

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* L.) (Koocheki et al., 2009a)، سیاهدانه (*Nigella sativa* L.) (Koocheki et al., 2009a)، خاکشیر (*Descurainia spohia* L.) (Koocheki et al., 2009a)، زیره‌سبز (*Cuminum cyminum* L.) (Koocheki et al., 2009a; Khorramdel et al., 2016)، 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)، بابونه (*Matricaria chamomilla* L.) (Naderi et al., 2009) (Darbaghshahi et al., 2009) بر عملکرد گل و بنه‌های دختری مؤثر و مثبت گزارش شده است.

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

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدیریت بهینه منابع آبی از جمله چالش‌های اصلی کشاورزی است. در این راستا، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین بوم‌سازگار 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 شبکه‌هایی آب‌دوست هستند که مقادیر زیادی آب را جذب و حفظ می‌نمایند. این پلیمرها به طور مناسب بر میزان نفوذ، تراکم، ساختار، فشردگی و بافت خاک و پایداری خاکدانه‌ها و سرعت تبخیر تأثیر می‌گذارند (Shajari et al., 2022). شجری و همکاران (Shajari et al., 2022) نشان دادند که کاربرد همزمان سوپرجاذب و اسید هیومیک در شرایط کم‌آبایی می‌تواند افزایش تحمل زعفران به خشکی و کارایی مصرف آب را افزایش داده و در نتیجه کیفیت و عملکرد کلاله را بهبود بخشد.

تغییرات اقلیمی بر پراکنش آفات و بیماری‌های گیاهی نیز تأثیر گذاشته و خسارات قابل‌توجهی به محصولات کشاورزی و همچنین زعفران وارد می‌کند. در این راستا، بازوبندی و همکاران (Bazoobandi et al., 2020) برای پیشگیری و کنترل کنه در مزارع زعفران ناشی از تغییرات اقلیمی، کاشت در زمین‌های حاصلخیز، غنی از عناصر غذایی و ماده آلی دارای بافت خاک سبک و کوددهی با کود دامی (کود گاوی) عاری از بذر علف‌های هرز و آفتاب‌دهی به مدت ۳۰ روز در ابتدای تابستان را توصیه کردند. این محققان همچنین پیشنهاد نمودند که بنه‌های مورد استفاده برای کاشت بهتر است از خاک خشک، جداسازی شده و پس از آن، بنه‌های سالم را غربال و انتخاب و قبل از کاشت ضدعفونی نمود. البته برخی تحقیقات نیز مؤید آن است که افزایش ساپونین‌ها و فنولیک‌های موجود در بنه زعفران نیز می‌تواند به مهار قارچ‌های بیماری‌زای الفاکننده پوسیدگی بنه در این گیاه مانند *F. Bipolaris spicifera* *Aspergillus niger* *Rhizopus* و *P. raistriicki* *oxysporum* کمک کند (Shahnaz et al., 2024).

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد گل، کلاله و بنه و خصوصیات کیفی زعفران دارد. در این راستا،

دلیل تاثیر مستقیم بر عملکرد گل و بنه و کیفیت نیز می‌تواند در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم مؤثر واقع شود.

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

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>
- 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>
- Bazoobandi, 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., Jolliet, 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., Guil-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]. <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., & Moayed, 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]. <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]. <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]. <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]. <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].
<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].
<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].
<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].
<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., & Aghhavani-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].
<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].
<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]. <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]. <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]. <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/jcesc.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]. <https://doi.org/10.22048/jsat.2021.283088.1423>
- Salteh, S. A., & Amani, M. (2021). Evaluation of climate effect on saffron's metabolites (crocin, picrocrocine 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]. <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
- Zakiaghil, 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]. <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>