

DOR: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0

اثر مصرف سوپر جاذب بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد کلاله زعفران (*Crocus sativus* L.)
در شرایط کم آبیاری

Effect of superabsorbent application on physiological traits and stigma yield of
saffron (*Crocus sativus* L.) in deficit irrigation conditions

محمد عظیمی گندمانی^۱ و مصطفی علی نقی زاده^۲

چکیده

عظیمی گندمانی، م. و م. علی نقی زاده. ۱۴۰۳. اثر مصرف سوپر جاذب بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد کلاله زعفران (*Crocus sativus* L.) در شرایط کم آبیاری. نشریه علوم زراعی ایران. ۲۶ (۳): ۳۳۲-۳۱۶.

استفاده از مواد جاذب رطوبت یکی از شیوه‌های مقابله با کمبود آب و حفظ منابع آبی در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌رود. آزمایش حاضر با هدف ارزیابی اثر مصرف مواد جاذب رطوبت در شرایط کم آبیاری بر صفات گیاهی و عملکرد کلاله زعفران به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی سه سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در اراضی کشاورزی منطقه زیار از توابع شهرستان اصفهان انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل کم آبیاری در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (به ترتیب تنش شدید، تنش متوسط و بدون تنش) به عنوان کرت اصلی و مقادیر سوپر جاذب استاکوزورب صفر، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، به عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شدند. صفات گیاهی شامل: محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و عملکرد گل و کلاله زعفران در سال دوم و سوم اندازه گیری شدند. نتایج آزمایش نشان داد که در هر دو سال آزمایش با افزایش مقدار آب آبیاری از ۵۰ درصد به ۱۰۰ درصد نیاز آبی، محتوای کلروفیل کل افزایش یافت. در هر دو سال آزمایش، افزایش مقدار مصرف سوپر جاذب نیز باعث افزایش محتوای کلروفیل کل شد (۱۰/۱ میلی گرم بر گرم وزن تر). بیشترین مقدار عملکرد گل تر در هر دو سال آزمایش (۱۵۵/۹ گرم در مترمربع در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۹۲/۷ گرم در مترمربع در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ به ترتیب در تیمارهای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی) همراه با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بدست آمدند. بیشترین مقدار عملکرد کلاله خشک در هر دو سال آزمایش (۱/۱۸ گرم در مترمربع در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱/۷۸ گرم در مترمربع در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲) در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی همراه با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بدست آمدند. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی همراه با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب عملکرد کلاله خشک ۰/۹۴ گرم در مترمربع و در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲، ۱/۱۸ گرم در مترمربع بود که نشان دهنده اثر مثبت مصرف سوپر جاذب در رفع اثر منفی کاهش مقدار آب آبیاری است. نتایج این تحقیق نشان داد که مصرف سوپر جاذب باعث کاهش اثر منفی کمبود آب در زراعت زعفران می‌شود و می‌توان این روش را به عنوان یک راهکار امیدوار کننده برای مدیریت بهینه منابع آب در زراعت زعفران در مناطق خشک در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی اکسیدانی، زعفران، رنگدانه‌های فتوسنتزی، عملکرد کلاله و عملکرد گل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳ این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی شماره ۴۰۱/د/۶۱۹۱/۱۰/۱۱ مصوب دانشگاه پیام نور می باشد

۱- استادیار گروه کشاورزی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (مکاتبه کننده، Mohammad.azimi@pnu.ac.ir)

۲- استادیار گروه کشاورزی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

Effect of superabsorbent application on physiological traits and stigma yield of saffron (*Crocus sativus* L.) in deficit irrigation conditions

Azimi Gandomani, M.¹ and Alinaghizadeh, M.²

ABSTRACT

Azimi Gandomani, M. and Alinaghizadeh, M. 2025. Effect of superabsorbent application on physiological traits and stigma yield of saffron (*Crocus sativus* L.) in deficit irrigation conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*. 26(1): 316-332. (In Persian).

Introduction: Saffron, an important crop in Iran's arid and semi-arid regions, plays a significant role in the livelihoods of farmers, and increasing the non-oil exports' incomes of the country (Ahmadian *et al.*, 2024). However, the limitation of water resources has imposed some challenges on expanding the cultivation and production of this valuable crop. Limited studies have explored the interactive effects of moisture-absorbing materials, soil conditioners, and irrigation regimes on saffron, particularly on product quality. This experiment aims to address two main objectives: (1) to assess the impact of water deficit on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, and saffron yield, and (2) to evaluate the effect of superabsorbents on photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, and yield under various irrigation regimes in deficit irrigation conditions.

Materials and Methods: This field experiment was conducted over three growing seasons (2020-21, 2021-22, and 2022-23) in the Ziayar region, in Isfahan Province, Iran. The experimental design was split-plot arrangements in randomized complete block design with three replications. Irrigation levels (50%, 75%, and 100% of the water requirements, which was severe, mild and non-stress, respectively) were assigned to the main plots, and the superabsorbent, Stockosorb, applied at three rates (0, 50, and 100 kg.ha⁻¹), was randomized to sub-plots. Saffron's water requirement, estimated using the Cropwat software, was 3280 cubic meters per hectare, calculated based on long-term meteorological data from 1994 to 2018. Irrigation was carried out using a counter-meter system and applied to furrows. In the first growing season, the first irrigation was done immediately after planting, with four irrigations per growing season (pre-flowering, post-flowering; mid-March, and late April). Irrigation rate for the 50%, 75%, and 100% levels were 1720, 2580, and 3440 m³, respectively. Measurements of photosynthetic pigments, antioxidant enzymes, proline content, and membrane stability were taken during the growing season from the young developed leaves in December at the saffron vegetative growth stage.

Results: Water deficit reduced chlorophyll_a, chlorophyll_b, carotenoids, and total pigments over the two years of the experiment (2021-22 and 2022-23). In contrast, the application of superabsorbents significantly mitigated the adverse effects of water stress in both years. Results showed that under all irrigation levels, the highest amounts of chlorophyll_a, chlorophyll_b, carotenoids, total pigments, antioxidant enzymes, and membrane stability were obtained in the 100% irrigation level and application of 100 kg.ha⁻¹ of superabsorbent. Additionally, as water deficit intensified, proline content also increased, while the superabsorbent application reduced leaf proline content under all irrigation regimes. The results demonstrated that the highest chlorophyll_a levels (5.60 and 5.30 mg.g⁻¹ fresh weight in 2021-22 and 2022-23, respectively), chlorophyll_b (1.40 and 1.37 mg.g⁻¹ fresh weight), carotenoids (3.10 and 3.40 mg.g⁻¹ fresh weight), catalase enzyme activity (3.81 and 3.69 μmol.min⁻¹.mg⁻¹ protein), superoxide dismutase (27.6 and 26.1 μmol.min⁻¹.mg⁻¹ protein), peroxidase (29.2 and 27.4 μmol.min⁻¹.mg⁻¹ protein), fresh flower yield (155.9 and 191.7 g.m⁻²), and dry stigma yield (1.18 and 1.78 g.m⁻²) were measured and recorded in 100% irrigation level and application of 100 kg.ha⁻¹ superabsorbent.

Conclusion: The results of this experiment indicated the positive effect of irrigation and superabsorbent application levels on the physiological traits, antioxidant enzymes, and economic yield of saffron. Physiological parameters such as chlorophyll, carotenoids, membrane stability, and proline were also improved. Irrigation and superabsorbent application levels enhanced antioxidant enzyme activities (catalase, superoxide dismutase, and peroxidase). These improvements were particularly remarkable in full irrigation (100% of water requirement). However, even under water deficit conditions (50% and 75% of water requirement), superabsorbents reduced the negative effects of water deficit stress and improved saffron leaf physiological responses. The results also showed that in water deficit conditions, the application of superabsorbents reduced the negative effects of water deficit stress and contributed to enhancing saffron yield. These results suggest that superabsorbents can be a beneficial soil amendment under drought stress conditions, improving saffron growth and yield.

Key words: Antioxidant enzymes, Flower yield, Photosynthetic pigments, Saffron and Stigma yield

Received: October, 2024

Accepted: January, 2025

1. Assistant Prof., Agriculture Department, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran (Corresponding author, ✉ Mohammad.azimi@pnu.ac.ir)

2. Assistant Prof., Agriculture Department, Faculty of Technical and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

مقدمه

تغییرات آب و هوایی به‌عنوان یکی از چالش‌های بزرگ جهانی در قرن بیست و یکم شناخته می‌شود که تأثیرات عمیق و غیرقابل برگشتی بر پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی و طبیعی دارد (Yang et al., 2021). آثار این تغییرات به‌ویژه در حوزه کشاورزی بسیار گسترده بوده و مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیشتر از سایر نقاط جهان از پیامدهای آن آسیب می‌بینند. کمبود شدید آب، جوامع انسانی را نیز به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. رشد جمعیت و افزایش نیاز به آب از جمله موانع کلیدی در مسیر توسعه پایدار به شمار می‌آید (Gorjian and Ghobadian, 2015). در مقیاس جهانی، حدود ۷۰ درصد از منابع آب به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود و این میزان در ایران به بیش از ۹۰ درصد می‌رسد. بر اساس اطلاعات موجود، میانگین کارایی روش‌های آبیاری در ایران حدود ۵۶ درصد است که در مقایسه با کشورهای توسعه یافته که کارایی آبیاری آن‌ها ۷۰ تا ۹۰ درصد می‌باشد، کمتر است. این تفاوت نشان‌دهنده نیاز به بهینه‌سازی شیوه‌های آبیاری در ایران برای افزایش بهره‌وری مصرف آب است (Ahmadian et al., 2024). بر این اساس استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری برای کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری، برای امنیت آبی این مناطق حیاتی به شمار می‌رود.

زراعت زعفران (*Crocus sativus* L.) به‌عنوان یکی از گیاهان مهم کشاورزی در ایران، به‌ویژه در مناطق شرقی و شمال شرقی، سابقه طولانی داشته و معیشت بسیاری از خانوارهای این مناطق با تولید زعفران گره خورده است. ایران از نظر سطح زیر کشت و تولید سالانه زعفران رتبه اول جهان را دارد، اما میانگین عملکرد زعفران در مقایسه با سایر کشورهای تولیدکننده پایین‌تر است. زعفران به‌عنوان یک گیاه متحمل به خشکی، به‌طور معمول در مناطق خشک و

نیمه‌خشک کشت می‌شود، اما افزایش دما و کاهش بارش‌ها در اثر تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث کاهش عملکرد و کیفیت محصول آن شود. افزایش دما به‌ویژه در دوره رشد گیاه، باعث کاهش میزان گلدهی و کوچک‌تر شدن کلاله‌های زعفران می‌شود. کاهش میزان بارش‌ها و خشکسالی‌های مداوم باعث کاهش رطوبت خاک می‌شود که این موضوع بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه اثر منفی گذاشته و به کاهش مقاومت گیاه نسبت به بیماری‌ها و آفات می‌شود. خشکسالی باعث تغییر در زمان گلدهی زعفران و تغییر در الگوهای برداشت محصول می‌شود. بنابراین، برای مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی، استفاده از روش‌های بهینه آبیاری و انتخاب ارقام متحمل به خشکی اهمیت ویژه‌ای دارد (Ahmadian et al., 2024).

در سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای برای افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی به کار گرفته شده است. در این راستا، رویکردهای کم‌آبیاری و مدیریت دفعات آبیاری مورد توجه قرار گرفته است. به‌علاوه جلوگیری از هدررفت آب با استفاده از ترکیبات جاذب آب به‌عنوان یک راهکار کلیدی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از مواد سوپر جاذب یک روش مفید برای مقابله با تنش خشکی و کاهش اثرات مضر آن در گیاهان زراعی است (Smagin et al., 2014). سوپر جاذب‌ها به‌عنوان مواد نگهدارنده قادر هستند مقدار زیادی آب و عناصر غذایی را ذخیره کرده و در شرایط نیاز گیاهان آن‌ها را به‌تدریج آزاد کنند. استفاده از سوپر جاذب‌ها باعث حفظ آب و عناصر غذایی خاک شده و دسترسی آسان گیاهان به آن‌ها را امکان پذیر می‌کند. این مواد باعث کاهش تنش اکسیداتیو و افزایش تولید زیست توده گیاه در شرایط تنش خشکی می‌شود. نتایج یک آزمایش نشان داد که مصرف مواد سوپر جاذب باعث افزایش قابل توجه رشد گیاه، محتوای کلروفیل، راندمان فتوسنتز و محتوای آب نسبی آب بوته‌های گوجه‌فرنگی در شرایط تنش

خشکی شده و فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز افزایش یافتند (Li et al., 2018). نتایج آزمایش خرم‌دل و همکاران (Khorramdel et al., 2013) روی گیاه زعفران نشان داد که مصرف پلیمر سوپر جاذب باعث افزایش وزن خشک کلانه شد. صفری و همکاران (Safari et al., 2018) گزارش کردند که مصرف سوپر جاذب با اصلاح خاک، باعث بهبود صفات مورفوفیزیولوژیکی و صفات عملکردی زعفران در شرایط تنش خشکی شد. حیدری و همکاران (Heidari et al., 2018) گزارش دادند که استفاده از سوپر جاذب‌ها همراه با کود زیستی نیتروکسین باعث بهبود قابل توجه ویژگی‌های عملکردی گیاه زعفران در شرایط تنش خشکی شد. خوش‌پیک و همکاران (Khoshpeyk et al., 2022) گزارش دادند که مصرف سوپر جاذب‌ها همراه با نانوسیلیکون‌ها باعث بهبود قابل توجه ویژگی‌های کمی و کیفی زعفران شد.

این آزمایش با هدف ۱- بررسی اثر کم‌آبیاری بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و عملکرد کلانه زعفران و ۲- ارزیابی اثر مصرف سوپر جاذب‌ها بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و عملکرد کلانه زعفران در تیمارهای آبیاری در یک اقلیم خشک اجرا شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش حاضر طی سه سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در اراضی کشاورزی شهر زیار از توابع شهرستان اصفهان، با مختصات طول و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی و ۵۱ درجه شرقی و ارتفاع ۱۵۷۰ متر از سطح دریا اجرا شد. ویژگی‌های آب و هوایی محل اجرای آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

قبل از اجرای آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه نمونه‌برداری شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و عناصر معدنی خاک تعیین شدند (جدول ۲). زمین محل اجرای آزمایش در فصل قبل زیر کشت گندم بود و سابقه زراعت زعفران نداشت. با توجه به پایین بودن ماده آلی خاک و همچنین اهمیت استفاده از کود دامی، کود دامی پوسیده به مقدار ۲۰ تن در هکتار به خاک داده شد. بر اساس نیاز کودی زعفران و نتایج تجزیه خاک، مقدار ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار پتاس از منبع سولفات پتاسیم قبل از کاشت به خاک افزوده و مخلوط شدند. با توجه به عدم تعریف کود نیتروژن در زراعت زعفران (Ahmadian et al., 2024)، از مصرف کود نیتروژن خودداری شد. آزمایش در هر سه سال در همان قطعه زمین اجرا شده و محل کرت‌های آزمایشی در هر سه سال ثابت بود و کودهای شیمیایی نیز در هر سال به خاک اضافه شدند. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل کم‌آبیاری در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (به ترتیب تنش شدید، تنش متوسط و بدون تنش) به عنوان عامل اصلی و مقادیر سوپر جاذب استاکوزورب (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار)، به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند (Jalili et al., 2018). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوپر جاذب استاکوزورب که از شرکت دیم گستران سبز آتیه نمایندگی شرکت استاکوزورب در ایران تهیه شد، در جدول ۳ ارائه شده است. ترکیب اصلی پلیمرهای سوپر جاذب، پلی‌اکریلات سدیم (Sodium Polyacrylate) هستند. در آزمایش حاضر پلیمر سوپر جاذب یک بار در زمان کاشت در اطراف بنه‌ها و ناحیه توسعه ریشه در عمق ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر به خاک افزوده شد (Ahmadian et al., 2024).

"اثر مصرف سوپر جاذب بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکرد کلاله زعفران...، عظیمی گندمانی و علی‌نقی‌زاده، ۱۴۰۳، ۳۳۲-۳۱۶"

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش (۱۴۰۱-۱۴۰۲ و ۱۴۰۰-۱۴۰۱، ۱۳۹۹-۱۴۰۰)

Table 1. Meteorological information of the experiment site (2020-2021, 2021-2022, and 2022-2023)

Month	ماه	Min. temperature (°C) دمای حداقل			Max. temperature (°C) دمای حداکثر			Rainfall (mm) بارندگی		
		۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۴۰۰-۱۴۰۱	۱۴۰۱-۱۴۰۲	۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۴۰۰-۱۴۰۱	۱۴۰۱-۱۴۰۲	۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۴۰۰-۱۴۰۱	۱۴۰۱-۱۴۰۲
		2020-21	2021-22	2022-23	2020-21	2021-22	2022-23	2020-21	2021-22	2022-23
Sep. 23 – Oct. 22	مهر	9.2	10.1	9.6	19.3	20	18.5	0.2	0.5	0
Oct. 23 – Nov. 21	آبان	3.4	5.2	4.8	15.6	16.8	17.2	3.2	4	3.8
Nov. 22 – Dec. 21	آذر	0.1	1.0	1.2	12.2	13.5	14.2	10.3	12.1	14.7
Dec. 22 – Jan. 20	دی	-1.5	-2.0	-0.72	8.2	9	9.5	5.23	6.5	10.2
Jan. 21 – Feb. 19	بهمن	0.68	0.5	.72	7.9	8.5	9.2	14.5	15.2	10.8
Feb. 20 – Mar. 20	اسفند	2.3	3.0	3.2	13.8	14.2	14.7	28.2	27.5	24.5
Mar. 21 – Apr. 20	فروردین	9.82	10.5	10.7	23.8	24.5	25.7	6.63	7	9.22
Apr. 21 – May 21	اردیبهشت	14.9	15.3	15.5	29.1	29.8	29.6	17.2	16.5	11.4
May 22 – Jun. 21	خرداد	21.1	21.5	21.8	37.1	36.9	37.2	0.2	0.3	1.1
Jun. 22 – Jul. 22	تیر	22.4	22.7	23.1	37.4	37	37.5	1.5	0.8	2.1
Jul. 23 – Aug. 22	مرداد	21.7	21.9	22.3	36.2	35.8	34.9	0	0	0
Aug. 23 – Sept. 22	شهریور	14.3	14.5	14.8	25.6	25.2	24.8	0	0	0

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of the soil at the experiment site

Year	سال	بافت Texture	نیترژن Nitrogen (%)	فسفر قابل جذب Available P (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Available K (mg.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)
2021-22	۱۴۰۰-۱۴۰۱	Silty loam لوم سیلنتی	0.065	13.2	186	7.66	1.79	0.616
2022-23	۱۴۰۱-۱۴۰۲	Silty loam لوم سیلنتی	0.071	18.4	242	7.71	1.83	0.721

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سوپر جاذب استاکوزورب

Table 3. Physical and chemical properties of Stockosorb superabsorbent

Solubility	حلالیت	Insoluble in water and organic solvents	نامحلول در آب و حلال‌های آلی
pH	اسیدیته	7 - 8	۷ تا ۸
Water absorption capacity	قابلیت جذب آب	Min. 150 and Max. 400 ml.g ⁻¹	حداقل ۱۵۰ و حداکثر ۴۰۰ میلی‌لیتر در گرم
The size of particles	اندازه ذرات	0.2 - 0.8 mm	۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر
Effective life span in the soil	طول عمر موثر در خاک	7-15 years	۷ تا ۱۵ سال
Available water content	مقدار آب قابل استفاده	>95%	بیش از ۹۵ درصد
Toxicology and ecology	سم‌شناسی و اکولوژی	Nontoxic	غیر سمی

عملیات تهیه زمین در شهریور ماه ۱۳۹۹ انجام شد. برای مصرف سوپر جاذب، شیارهایی به عمق تقریبی ۱۰ سانتی متر در امتداد عرض کرت‌ها ایجاد و سوپر جاذب درون شیارها ریخته شده و روی آنها خاک ریخته شد. بنه‌های زعفران مورد استفاده در این آزمایش توده تربت حیدریه بودند. بنه‌های زعفران در دوم شهریور ماه ۱۳۹۹ در کرت‌هایی به طول سه متر و عرض یک متر، شامل ۱۵ ردیف با فاصله ۲۰ سانتی متر و فاصله روی ردیف پنج سانتی متر کاشته شدند. بین هر کرت ۵۰ سانتی متر و بین هر تکرار یک متر فاصله در نظر گرفته شد. وزن بنه‌های مورد استفاده ۱۰ تا ۱۵ گرم بود که پس از حذف فلس‌های خارجی با دست در عمق ۱۵ سانتی متری کاشته شدند. نیاز آبی زعفران بر اساس اطلاعات هواشناسی بلندمدت (۱۹۹۴ تا ۲۰۱۸) با استفاده از نرم افزار Cropwat ۳۲۸۰، مترمکعب در هکتار برآورد شد. آبیاری با استفاده از کنتور و به صورت شیاری انجام شد. در سال اول، نخستین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت بنه‌ها انجام شد. در هر سال چهار نوبت آبیاری (قبل از گلدهی، بعد از گلدهی، اواسط اسفند و اواخر فروردین) انجام شد. مقدار آب آبیاری در تیمارهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۱۷۲۰، ۲۵۸۰ و ۳۴۴۰ مترمکعب بود. در هر سه سال آزمایش کنترل علف‌های هرز با وجین دستی در دو نوبت (بهمن و فروردین) انجام شد.

با توجه به اثر ویژگی‌های بنه به‌ویژه ذخایر غذایی آن بر رشد و عملکرد زعفران، برای اندازه‌گیری صفات از داده‌های سال دوم و سوم استفاده شد. گل‌های زعفران در ماه آبان به‌صورت روزانه از مساحت ۰/۲ مترمربع از هر کرت برداشت شده و وزن آنها بلافاصله با استفاده از ترازوی دیجیتالی دقیق اندازه‌گیری شدند. پس از آن کلالة‌های زعفران جدا شده و به‌مدت ۷۲ ساعت در دمای اتاق خشکانده شدند. برای اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پرولین و پایداری غشای سلولی در مرحله رشد رویشی

گیاه، در دی ماه از آخرین برگ‌های جوان توسعه یافته نمونه‌برداری شد. نمونه‌برداری در ساعات اولیه صبح انجام گرفت. محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها با استفاده از روش آرنون اندازه‌گیری شدند (Arnon, 1967). اندازه‌گیری آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز با استفاده از روش ناکانو و آسادا (Nakano and Asada, 1981) انجام شد. اندازه‌گیری پرولین با استفاده از روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) و اندازه‌گیری پایداری غشای سلول با استفاده از روش سایرام و سریوستاوا (Sairam and Srivastava, 2001) انجام شدند.

بر اساس نتایج آزمون بارتلت و ناهمگن بودن واریانس خطاهای آزمایشی، داده‌های هر سال به‌صورت جداگانه تجزیه شدند. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و MS-Excel انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و برهمکنش آبیاری و سوپر جاذب در هر دو سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲ بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاهش مقدار آب آبیاری، محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها و کلروفیل کل در هر دو سال آزمایش کاهش یافتند (جدول‌های ۴ و ۵). مصرف سوپر جاذب اثر کمبود آب را در هر دو سال آزمایش به‌طور معنی‌داری کاهش داد. نتایج نشان داد که در هر سه سطح آبیاری، بیشترین و کمترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها و کلروفیل کل به‌ترتیب مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بود. تفاوت میزان کلروفیل a در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰

درصد به ترتیب ۴۲، ۵۳ و ۵۱ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۴۶، ۵۰ و ۳۶ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. تفاوت بیشترین و کمترین میزان کلروفیل b به ترتیب ۲۵۵، ۱۳۳ و ۸۷ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۲۶۲، ۱۵۴ و ۵۹ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. این تفاوت برای محتوای کاروتنوئیدها در سال اول به ترتیب ۵۸، ۹۴ و ۱۰۷ درصد و در سال دوم به ترتیب ۳۱، ۶۱ و ۱۰۰ درصد بود. بیشترین و کمترین میزان کلروفیل کل به ترتیب مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بود. تفاوت بیشترین و کمترین میزان کلروفیل کل در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۵۶، ۷۵ و ۷۰ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۴۴، ۶۳ و ۵۶ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. در هر سه سطح تیمار آبیاری، با مصرف سوپر جاذب بر محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی افزوده شد، اما در تیمار آبیاری ۵۰ درصد، کلروفیل b، در تیمار ۷۵ درصد کلروفیل a و تیمار ۱۰۰ درصد برای کاروتنوئیدها اثر مثبت سوپر جاذب بیشتر بود. در هر دو سال زراعی ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۲-۰۲ با کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد، نسبت کلروفیل a/b افزایش یافت. در هر سه سطح تنش خشکی، با افزایش مقادیر سوپر جاذب از صفر به ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، از نسبت کلروفیل a/b کاسته شد (جدول‌های ۴ و ۵).

فخری و همکاران (Fakhri et al., 2024) گزارش کردند که در گیاه آویشن معمولی (*Thymus vulgaris* L.)، بیشترین میزان کلروفیل a در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد و کمترین میزان کلروفیل a و b به تیمار آبیاری یک در میان جویچه‌ای ثابت اختصاص داشت. آن‌ها اظهار داشتند که بیشترین میزان کلروفیل a از تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب به دست آمد و کمترین میزان کلروفیل a و b مربوط به تیمار بدون مصرف سوپر جاذب بود. گزارش شده است که گیاهانی که نسبت به خشکی حساس‌تر هستند، ساختارهای کلروفیل-پروتئین و

لیپید ناپایدارتری دارند. تنش خشکی باعث کاهش تشکیل پلاستیدهای جدید و کاهش تولید کلروفیل a و b شده و نسبت کلروفیل a به b را تغییر می‌دهد (Yang et al., 2021). کاهش محتوای کلروفیل در شرایط تنش خشکی احتمالاً به دلیل افزایش تخریب این رنگیزه‌ها، کاهش سنتز آن‌ها یا اختلال در عملکرد آنزیم‌های مرتبط با سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی است (Zia et al., 2021). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که محتوای کلروفیل برگ زعفران در واکنش به افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد و کمترین میزان کلروفیل مربوط به تیمار آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بود. این کاهش احتمالاً ناشی از اختلال در جذب عناصر غذایی مورد نیاز برای سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی است. یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نیز گزارش کردند که برگ‌های زعفران با شاخص کلروفیل بالاتر، پایداری بیشتری دارند و مدت زمان بیشتری از تابش برای فتوسنتز بهره‌مند می‌شوند. گزارش شده است که تنش کم آبی کلیه صفات گیاهی از جمله محتوای کلروفیل را کاهش می‌دهد، اما استفاده از سوپر جاذب‌ها باعث بهبود این صفات می‌شود (Yang et al., 2023). نتایج آزمایش رازبان و پیرزاد (Razban and Pirzad, 2012) روی بابونه آلمانی نشان داد که محتوای کلروفیل در شرایط تنش خشکی شدید، کاهش قابل توجهی نسبت به تیمار آبیاری کامل داشت. با ادامه تنش شدید خشکی، مقادیر کلروفیل a، b و کل به حداقل رسید و بیشترین مقدار کلروفیل با استفاده از بیشترین میزان سوپر جاذب حاصل شد. نتایج آزمایش دیگری نشان داد که در زعفران با مصرف پلیمر سوپر جاذب با نسبت حجمی ۱۰:۹۰ در شرایط تنش شوری، محتوای کلروفیل a و کلروفیل b افزایش یافتند (Khoshpeyk et al., 2022).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و برهمکنش آبیاری و سوپر جاذب در هر دو سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲ بر فعالیت آنزیم‌های

جدول ۴- مقایسه میانگین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی زعفران در تیمارهای آبیاری و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۱-۱۴۰۰)

Table 4. Mean comparison of photosynthetic pigments content of saffron in irrigation and superabsorbent application treatments (2021-2022)

Treatments	تیمارهای آزمایشی	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل
آبیاری	سوپر جاذب	Chl _a (mg.g ⁻¹ FW)	Chl _b (mg.g ⁻¹ FW)	Carotenoids (mg.g ⁻¹ FW)	Chlorophyll a/b ratio	Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)
Irrigation	Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)					
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	0	3.70	0.75	1.50	4.93	5.95
	50	4.90	1.00	2.40	4.89	8.30
	100	5.60	1.40	3.10	4.00	10.1
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requirement	0	3.20	0.60	1.70	5.33	5.50
	50	4.70	0.85	2.20	5.52	7.75
	100	4.90	1.40	3.30	3.50	9.60
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	0	2.40	0.31	1.20	7.73	3.91
	50	3.10	0.50	1.60	6.80	5.50
	100	3.40	1.10	1.90	2.82	6.10
LSD _{5%}		0.58	0.09	0.30	0.37	0.38

جدول ۵- مقایسه میانگین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی زعفران در تیمارهای آبیاری و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۲-۱۴۰۱)

Table 5. Mean comparison of photosynthetic pigments content of saffron in irrigation and superabsorbent application treatments (2022-2023)

Treatments	تیمارهای آزمایشی	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئیدها	نسبت کلروفیل a/b	کلروفیل کل
آبیاری	سوپر جاذب	Chl _a (mg.g ⁻¹ FW)	Chl _b (mg.g ⁻¹ FW)	Carotenoids (mg.g ⁻¹ FW)	Chlorophyll a/b ratio	Total chlorophyll (mg.g ⁻¹ FW)
Irrigation	Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)					
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	0	3.90	0.860	1.70	4.55	6.46
	50	4.60	1.06	2.20	4.35	7.86
	100	5.30	1.37	3.40	3.87	10.1
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requirement	0	3.40	0.52	1.80	6.58	5.72
	50	4.30	0.91	2.00	4.74	7.21
	100	5.10	1.32	2.90	3.86	9.32
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	0	2.20	0.29	1.30	7.75	3.79
	50	2.70	0.54	1.50	5.98	5.24
	100	3.20	1.05	1.70	2.57	5.45
LSD _{5%}		0.59	0.11	0.57	1.64	0.14

آنتی‌اکسیدانی برگ معنی‌دار بودند. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاهش مقدار آب آبیاری، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز در هر دو سال آزمایش کاهش یافتند. مصرف سوپر جاذب باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش اثر منفی کمبود آب در هر دو سال آزمایش شد. نتایج نشان داد که در هر سه سطح آبیاری، بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به ترتیب مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بود. تفاوت بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۲۴۷، ۷۳ و ۶۰ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۷۶، ۳۶ و ۵۹ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب ۹۱، ۲۴۷ و ۱۳۲ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۶۸، ۲۶ و ۱۱۱ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۱۳۲، ۱۳۰ و ۸۴ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۴۳، ۸۱ و ۹۳ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. بدین ترتیب می‌توان بیان داشت که در هر سه سطح تیمار آبیاری، با مصرف سوپر جاذب بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزوده شد، ولی در تیمار آبیاری ۵۰ درصد، فعالیت آنزیم کاتالاز و در تیمار آبیاری ۷۵ درصد، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز اثر مثبت مصرف سوپر جاذب بیشتر بود (جدول‌های ۶ و ۷).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده رشد گیاهان است که باعث ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف از جمله فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و

پراکسیداز نقش مهمی در حفاظت از سلول‌های گیاهی در برابر آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو دارند. در شرایط تنش خشکی، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) افزایش یافته و باعث آسیب به ساختارهای سلولی، لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود (Juan et al., 2021). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز، که به ترتیب پراکسید هیدروژن و رادیکال سوپراکسید را تجزیه می‌کنند، سازوکار دفاعی مهمی برای گیاهان در شرایط تنش خشکی محسوب می‌شود. پراکسیدازها نیز از جمله آنزیم‌های کلیدی در خنثی کردن پراکسیدهای تولید شده در گیاه هستند که به حفظ پایداری سلولی کمک می‌کنند (Jomova et al., 2024). با این حال، اگر تولید گونه‌های فعال اکسیژن بیش از حد و بالاتر از ظرفیت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه شود، گیاه با تنش اکسیداتیو مواجه می‌شود که باعث کاهش کارایی سیستم آنتی‌اکسیدانی می‌شود. در چنین شرایطی، تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن باعث آسیب به خود آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز می‌شود، زیرا پروتئین‌ها و ساختارهای سلولی آنزیم‌ها نیز تحت تأثیر اکسیداسیون قرار می‌گیرند. این موضوع می‌تواند باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شود. در نتیجه، تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن باعث کاهش ظرفیت دفاعی گیاه و در نتیجه آسیب بیشتر به سلول‌ها می‌شود (Zia-ur-Rehman et al., 2023). گزارش شده است که در گیاه گندم در شرایط تنش شدید خشکی، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در مراحل پیشرفته خشکی کاهش یافتند. در چنین شرایطی، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن نه تنها باعث تخریب مستقیم ساختارهای سلولی می‌شود، بلکه باعث مهار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز می‌شود. این کاهش فعالیت می‌تواند به دلیل اکسیداسیون پروتئین‌های آنزیمی یا کاهش توانایی گیاه

در سنتز این آنزیم‌ها در شرایط تنش شدید باشد (Jomova et al., 2024). گزارش شده است که در گیاه کینوا با افزایش شدت تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز کاهش یافتند (Alinaghizadeh and Azimi, 2025). در گیاه مریم گلی نیز با افزایش شدت تنش خشکی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یافته و پس از آن در تیمار تنش شدید خشکی کاهش یافت (Ghias et al., 2022). سوپر جاذب‌ها در شرایط تنش خشکی بر کارکردهای گیاهان اثر مثبتی داشته و باعث کاهش اثر منفی تنش اکسیداتیو ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن می‌شوند. این مواد با توانایی جذب و نگهداری آب در خاک به مدت طولانی، باعث افزایش فراهمی رطوبت برای ریشه‌های گیاه شده و کاهش اثر منفی تنش خشکی می‌شوند. در نتیجه با دسترسی بهتر گیاه به آب، سامانه‌های دفاعی گیاه بهبود یافته و شدت تنش کاهش می‌یابد (Sepehri et al., 2023). سوپر جاذب‌ها به تنظیم بهتر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز کمک می‌کنند. در شرایط تنش خشکی، فعالیت این آنزیم‌ها در ابتدا برای خنثی کردن اثر منفی گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد، اما با شدت گرفتن تنش و تجمع بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن، کارایی این آنزیم‌ها کاهش می‌یابد. سوپر جاذب‌ها با کاهش اثر منفی تنش خشکی و متعادل کردن میزان رطوبت، باعث می‌شوند که گونه‌های فعال اکسیژن بطور موثرتری خنثی شده و از کاهش فعالیت این آنزیم‌ها جلوگیری شود (Malik et al., 2023).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سوپر جاذب و برهمکنش آنها در هر دو سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲ بر محتوای پرولین معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر دو سال آزمایش با کاهش مقدار آب آبیاری

(افزایش شدت تنش، محتوای پرولین برگ افزایش یافت. در هر سه سطح آبیاری، با افزایش مقادیر سوپر جاذب از میزان پرولین برگ کاسته شد. تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان پرولین در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۵۵، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۶۷، ۱۷۵ و ۶۰ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود. نتایج نشان داد که در هر سه سطح تیمار آبیاری، با مصرف سوپر جاذب بر میزان پرولین برگ افزوده شد، ولی در تیمار آبیاری ۷۵ درصد، اثر مثبت سوپر جاذب بیشتر بود (جدول‌های ۶ و ۷). پرولین یکی از ترکیبات محافظ غشاهای سلولی است که نقش مهمی در حفاظت از گیاهان در برابر تنش خشکی دارد. با مواجهه گیاه با تنش خشکی، تجمع پرولین در بافت‌های گیاهی افزایش یافته و باعث کاهش اثر منفی تنش می‌شود (Kijowska-Oberc et al., 2023). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که در هر سطح تیمار آبیاری، مصرف سوپر جاذب باعث کاهش محتوای پرولین گیاه شد. این موضوع نشان می‌دهد که سوپر جاذب می‌تواند اثر منفی تنش خشکی بر گیاه زعفران را تعدیل کند. به عبارت دیگر، مصرف سوپر جاذب باعث کاهش تجمع پرولین در گیاه می‌شود. سوپر جاذب‌ها با تامین تدریجی آب برای گیاه، از وقوع نوسانات رطوبتی و بروز تنش کم‌آبی جلوگیری کرده و به همین دلیل باعث کاهش میزان تجمع پرولین در شرایط تنش خشکی می‌شوند. این یافته با نتایج سایر آزمایش‌ها نیز مطابقت دارد (Oyebamiji et al., 2024).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری و سوپر جاذب بر پایداری غشای سلول معنی‌دار بود. با کاهش مقدار آب آبیاری (افزایش شدت تنش) از میزان پایداری غشاء کاسته شد، به طوری که تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان پایداری غشاء در تیمارهای آبیاری برای دو سال آزمایش به ترتیب ۲۹ و

"اثر مصرف سوپر جاذب بر ویژگی های فیزیولوژیکی و عملکرد کلاله زعفران...، عظیمی گندمانی و علی نقی زاده، ۱۴۰۳، ۳۳۲-۳۱۶"

جدول ۶- مقایسه میانگین فعالیت آنزیمی زعفران در تیمارهای آبیاری و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۱-۱۴۰۰)

Table 6. Mean comparison of enzymatic activity of saffron in irrigation and superabsorbent application treatments (2021-2022)

Treatments	تیمارهای آزمایشی	کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز	پرولین
آبیاری	سوپر جاذب	Catalase	Superoxide dismutase	Peroxidase	Proline (mg.g ⁻¹ FW)
Irrigation	Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	0	2.38	11.9	15.9	0.080
	50	2.91	18.3	24.3	0.070
	100	3.81	27.6	29.2	0.040
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requirement	0	1.78	7.6	10.2	0.100
	50	2.39	13.1	18.8	0.090
	100	3.08	26.6	23.5	0.050
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	0	0.83	4.3	5.0	0.170
	50	1.11	5.5	7.2	0.110
	100	2.88	8.3	11.8	0.110
LSD _{5%}		0.48	4.1	2.8	0.023

جدول ۷- مقایسه میانگین فعالیت آنزیمی زعفران در تیمارهای آبیاری و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۲-۱۴۰۱)

Table 7. Mean comparison of enzymatic activity of saffron in irrigation and superabsorbent application treatments (2022-2023)

Treatments	تیمارهای آزمایشی	کاتالاز	سوپراکسید دیسموتاز	پراکسیداز	پرولین
آبیاری	سوپر جاذب	Catalase	Superoxide dismutase	Peroxidase	Proline (mg.g ⁻¹ FW)
Irrigation	Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	($\mu\text{mol.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ protein)	
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	0	2.32	12.4	14.2	0.080
	50	3.11	16.7	22.8	0.060
	100	3.69	26.1	27.4	0.050
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requirement	0	1.94	9.20	11.8	0.110
	50	2.33	11.6	17.2	0.100
	100	2.63	24.7	21.3	0.040
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	0	0.95	5.65	7.21	0.150
	50	1.04	5.92	7.92	0.100
	100	2.62	7.12	10.3	0.090
LSD _{5%}		0.49	4.6	3.5	0.025

پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای نوکلئیک شده و در اثر پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، به غشای سلولی آسیب می‌زنند (Sachdev *et al.*, 2021). به علاوه تنش خشکی باعث اختلال در فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی می‌شود که این موضوع باعث افزایش اکسیداسیون لیپیدهای غشایی و وارد شدن خسارت به غشاهای سلولی می‌شود (Khaleghi *et al.*, 2019). گزارش شده است که در شرایط تنش خشکی، گیاهان با افزایش تولید ترکیبات حفاظتی مانند پرولین به تنش واکنش نشان می‌دهند، اما مصرف سوپر جاذب‌ها باعث کاهش نیاز به تولید بیش از حد پرولین می‌شود، زیرا آب مورد نیاز گیاه به صورت مداوم و پایدار در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. این موضوع باعث حفظ غشاهای سلولی و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی می‌شود (Malik *et al.*, 2022).

۲۷ درصد بود (جدول ۸). با افزایش مصرف سوپر جاذب میزان پایداری غشاء افزوده شد و تفاوت بین بیشترین و کمترین میزان پایداری غشاء برای تیمارهای سوپر جاذب در دو سال آزمایش به ترتیب ۲۵ و ۱۵ درصد بود (جدول ۸). گزارش شده است که تخریب غشاهای سلولی باعث بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تثبیت دی‌اکسید کربن می‌شود، در حالی که واکنش‌های نوری و انتقال الکترون ادامه پیدا می‌کنند. در این شرایط، موجودی NADP برای پذیرش الکترون محدود است و اکسیژن به عنوان یک گیرنده الکترون جایگزین عمل می‌کند. این موضوع باعث تجمع گونه‌های سمی اکسیژن، نظیر رادیکال‌های سوپر اکسید، هیدروژن پراکسید و رادیکال هیدروکسید می‌شود. تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش، باعث وارد شدن آسیب به ترکیبات سلولی مانند لیپیدها،

جدول ۸- مقایسه میانگین پایداری غشای سلولی زعفران در تیمارهای آبیاری و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۰-۰۱ و ۰۲-۱۴۰۱)

Table 8. Mean comparison of cell membrane stability of saffron in irrigation and superabsorbent

application treatments (2021-2022 and 2022-2023)		
تیمارهای آبیاری Treatments	پایداری غشای سلول Cell membrane stability (%)	
	۱۴۰۱-۱۴۰۰ 2021-2022	۱۴۰۲-۱۴۰۱ 2022-2023
آبیاری Irrigation		
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	67.6	68.9
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requiremen	55.5	56.1
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	52.6	54.2
LSD _{5%}	6.65	6.71
سوپر جاذب Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)		
0	52.7	56.6
50	59.4	57.7
100	65.6	65.0
LSD _{5%}	7.4	7.0

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری، سوپر جاذب و برهمکنش آن‌ها بر عملکرد گل تر و عملکرد کلاله خشک در هر دو سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۴۰۱-۰۲ معنی‌دار بود. بیشترین مقدار عملکرد گل تر در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد به دست آمد و با کاهش مقدار آب آبیاری عملکرد گل تر کاهش یافت (جدول ۹). گزارش شده است که در زراعت زعفران بین میزان تولید گل و دسترسی به آب همبستگی بالایی وجود دارد و برای دستیابی به عملکرد بالاتر گل، افزایش میزان آبیاری ضروری است (Esmaeilian et al., 2022). نتایج آزمایش حاضر نشان داد که با افزایش میزان آب آبیاری و مصرف سوپر جاذب، عملکرد گل تر نیز افزایش یافت. در تیمارهای مصرف سوپر جاذب و تیمارهای آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد، افزایش عملکرد گل تر نسبت به تیمارهای بدون مصرف سوپر جاذب بیشتر بود. در هر سه سطح آبیاری، بیشترین و کمترین عملکرد گل تر و عملکرد کلاله خشک به ترتیب در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر جاذب بدست آمد. تفاوت بین بیشترین و کمترین عملکرد گل تر در سه سطح تیمار آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۴۴، ۶۳ و ۴۱ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۱۶، ۳۵ و ۱۱ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود (جدول ۹). بنابر نظریه و همکاران (Yu et al, 2017) میزان رس و مواد آلی در اکثر خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک پایین و ظرفیت نگهداری آب نیز در آنها پایین است در این مناطق وقوع تنش خشکی باعث کاهش عملکرد گیاهان شده و مصرف مواد سوپر جاذب باعث کاهش اثرات منفی خشکی بر گیاهان می‌شود.

نتایج نشان داد که تغییر در عملکرد کلاله خشک در تیمارهای آبیاری و سوپر جاذب روند مشابهی را با عملکرد گل تر داشتند. کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش عملکرد کلاله خشک در دو

سال آزمایش شد. این یافته با نتایج آزمایش اسماعیلیان و همکاران (Esmaeilian et al., 2022) مطابقت دارد بدین ترتیب که با کاهش مقدار آب آبیاری تا ۷۵ و ۵۰ درصد، عملکرد کلاله زعفران ۲۱ و ۳۷ درصد کاهش یافت. در هر سه سطح آبیاری، بیشترین عملکرد کلاله خشک در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم سوپر جاذب بدست آمد و کمترین عملکرد کلاله خشک نیز در تیمار بدون مصرف سوپر جاذب ثبت شد. تفاوت بین بیشترین و کمترین عملکرد کلاله خشک در سه سطح تیمار آبی ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب ۳۸، ۳۹ و ۳۳ درصد در سال ۱۴۰۰-۰۱ و ۵۱، ۳۲ و ۳۵ درصد در سال ۱۴۰۱-۰۲ بود (جدول ۹). با توجه به اینکه در آبیاری زعفران از روش حوضچه‌ای استفاده می‌شود و این موضوع ممکن است باعث تلفات آب و مواد غذایی از طریق آبیاری شود، استفاده از مواد سوپر جاذب می‌تواند به طور بالقوه باعث کاهش این تلفات شده و در نتیجه عملکرد کلاله خشک زعفران افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان‌دهنده اثر تیمارهای آبیاری و اثر مثبت مصرف سوپر جاذب بر صفات فیزیولوژیک، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و عملکرد گل و کلاله زعفران است. به طور خاص، بهبود شاخص‌های فیزیولوژیکی مانند محتوای کلروفیل، کاروتنوئیدها، پایداری غشای سلولی و پروتئین و همچنین بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز) با مدیریت آبیاری و مصرف سوپر جاذب مشاهده شد. این بهبود به ویژه در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی (آبیاری کامل؛ بدون تنش) معنی‌دار بود. در تیمارهای کم آبیاری (۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی) نیز مصرف سوپر جاذب با بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه باعث کاهش اثر منفی ناشی از تنش خشکی شد. به عبارت دیگر، در

جدول ۹- مقایسه میانگین عملکرد گل و عملکرد کلاله زعفران در تیمارهای و مصرف سوپر جاذب (۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲)

Table 9. Mean comparison of flower yield and stigma yield of saffron in irrigation and superabsorbent application treatments (2021-2022 and 2022-2023)

تیمارهای آزمایشی Treatments		عملکرد گل تر Fresh flower yield (g.m ⁻²)	عملکرد کلاله خشک Dry stigma yield (g.m ⁻²)	عملکرد گل تر Fresh flower yield (g.m ⁻²)	عملکرد کلاله خشک Dry stigma yield (g.m ⁻²)
آبیاری Irrigation	سوپر جاذب Superabsorbent (kg.ha ⁻¹)	۱۴۰۲-۱۴۰۱ 2021-2022		۱۴۰۳-۱۴۰۲ 2022-2023	
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% water requirement	0	110.5	0.89	172.5	1.32
	50	131.0	0.99	188.9	1.53
	100	155.9	1.18	191.2	1.78
۷۵ درصد نیاز آبی 75% water requirement	0	91.5	0.83	142.5	1.30
	50	124.1	1.03	166.8	1.49
	100	149.2	1.15	192.7	1.71
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	0	81.1	0.68	122.2	0.78
	50	96.9	0.81	133.4	1.02
	100	117.1	0.94	141.1	1.18
LSD _{5%}		21.5	0.144	24.1	0.144

شدید) و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب در میانگین دو سال به ۰/۶۱۶ میلی گرم بر مترمکعب افزایش یافت (۴۲ درصد افزایش). این نتایج نشان می‌دهد که مصرف مواد جاذب رطوبت (سوپرجاذب‌ها) می‌تواند به عنوان اصلاح کننده خاک در شرایط کم آبی، باعث بهبود رشد و عملکرد زعفران و افزایش بهره‌وری آب آبیاری در مناطق خشک شود.

شرایط کم آبی، استفاده از سوپرجاذب باعث کاهش اثر منفی خشکی ناشی از کم آبیاری و بهبود عملکرد زعفران شد. بهره‌وری آب آبیاری برای عملکرد کلاله خشک در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی (آبیاری کامل؛ بدون تنش) و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرجاذب در میانگین دو سال ۰/۴۳ میلی گرم بر مترمکعب بود که در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی (تنش

References

منابع مورد استفاده

- Alinaghizadeh, M. and Azimi Gandomani, M. 2025.** Effect of silicon application on physiological traits and seed yield of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 26(1), pp. 1-20. [In Persian]. doi: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0
- Ahmadian, A., Esmaeilian, Y., Tavassoli, A., Fernández-Gálvez, J., and Caballero-Calvo, A. 2024.** Application of a superabsorbent hydrogel for improving water productivity and quality of saffron (*Crocus sativus* L.) under water deficit conditions. *Scientia Horticulturae*, 336, 113411. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113411>
- Arnon, A.N. 1967.** Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, pp.112-121.
- Bates, L.S., Waldern, R.P., and Tear, I.D. 1973.** Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, pp.205-207.
- Esmaeilian, Y., Amiri, M.B., Tavassoli, A., Caballero-Calvo, A., and Rodrigo-Comino, J. 2022.** Replacing chemical fertilizers with organic and biological ones in transition to organic farming systems in saffron (*Crocus sativus*) cultivation. *Chemosphere*, 307, 135537. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135537>
- Fakhri, K., Sayfzadeh, S., Sarajooghi, M., Valad Abadi, S.A., and Hadidi Masouleh, E. 2024.** The effect of biochar application and planting pattern on the physiological and biochemical traits of garden thyme (*Thymus vulgaris* L.) at different levels of irrigation. *Journal of Medicinal Plants and By-Products*, 13(4), pp.999-1015. <https://doi.org/10.22034/jmpb.2023.363598.1610>
- Ghias, S., Shirmardi, M., Meftahizadeh, H., and Dehestani Ardakani, M. 2022.** Effect of biochar and hydrogel on morphophysiological characteristics of common sage (*Salvia officinalis* L.) under drought stress. *Plant Production*, 45(1), pp.67-89. [In Persian]. doi: 10.22055/ppd.2021.36030.1962
- Gorjian, S., and Ghobadian, B. 2015.** Solar desalination: a sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, pp.571-584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.009>
- Heidari, S., Azizi, K., and Ismaili, A. 2018.** Effects of Nitroxin bio-fertilizer, superabsorbent polymer and planting method on yield of flower and corm of saffron (*Crocus sativus* L.) in rainfed-farming condition of Khorramabad, Iran. *Journal of Saffron Agronomy and Technology*, 6(4), pp.461-472. [In Persian]. doi:

10.22048/jsat.2017.81060.1221

- Jalili, S., Hadi, M., and Majnooni Heris, A. 2018.** Effect of superabsorbent polymer on yield and yield components of irrigated and rainfed wheat. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48(4), pp.923-931. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2017.223031.654237
- Jomova, K., Alomar, S.Y., and Alwasel, S.H. 2024.** Several lines of antioxidant defense against oxidative stress: antioxidant enzymes, nanomaterials with multiple enzyme-mimicking activities, and low-molecular-weight antioxidants. *Archives of Toxicology*, 98, pp.1323–1367. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03696-4>
- Juan, C.A., Pérez de la Lastra, J.M., Plou, F.J., and Pérez-Lebeña, E. 2021.** The Chemistry of Reactive Oxygen Species (ROS). Revisited: Outlining their role in biological macromolecules (DNA, lipids and proteins) and induced pathologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 4642. <https://doi.org/10.3390/ijms22094642>
- Khaleghi, A., Naderi, R., and Brunetti, C. 2019.** Morphological, physiochemical and antioxidant responses of *Maclura pomifera* to drought stress. *Scientific Reports*, 9, 19250. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55889-y>
- Khorramdel, S., Gheshm, R., Amin Ghafari, A., and Esmailpour, B. 2013.** Evaluation of soil texture and superabsorbent polymer impacts on agronomical characteristics and yield of saffron. *Journal of Saffron Research*, 1(2), pp.120-135. [In Persian]. doi: 10.22077/jsr.2013.439
- Khoshpeyk, S., Sadrabadi Haghghi, R., and Ahmadian, A. 2022.** The effect of irrigation water quality and application of silicon, nanosilicon and superabsorbent polymer on the yield and active ingredient of saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Saffron Research*, 10(1), pp.64-83. [In Persian]. doi: 10.22077/jsr.2021.4461.1163
- Kijowska-Oberc, J., Dylewski, L., and Ratajczak, E. 2023.** Proline concentrations in seedlings of woody plants change with drought stress duration and are mediated by seed characteristics: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 13, 15157. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40694-5>
- Li, J., Liu, L., Zhou, H., and Li, M. 2018.** Improved viability of tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings under drought stress using a superabsorbent polymer. *Horticultural Science*, 53(12), pp.1872-1876. doi.org/10.21273/HORTSCI13586-18
- Malik, S., Chaudhary, K., Malik, A., Punia, H., Sewhag, M., Berkesia, N., Nagora, M., Kalia, S., Malik, K., Kumar, D., Kumar, P., Kamboj, E., Ahlawat, V., Kumar, A., and Boora, K. 2022.** Superabsorbent polymers as a soil amendment for increasing agriculture production with reducing water losses under water stress condition. *Polymers (Basel)*, 29;15(1):161. doi: 10.3390/polym15010161
- Nakano, Y., and Asada, K. 1981.** Hydrogen peroxide is scavenged by accurate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22, pp.867-880.
- Oyebamiji, Y.O., Adigun, B.A., Shamsudin, N.A.A., Ikmal, A.M., Salisu, M.A., Malike, F.A., and Lateef,**

- A.A. 2024.** Recent advancements in mitigating abiotic stresses in crops. *Horticulturae*, 10, 156. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10020156>
- Razban, M., and Pirzad, A. 2012.** Evaluate the effect of varying amounts of super absorbent under different irrigation regimes on growth and water deficit tolerance of German chamomile (*Matricaria Chamomilla*), as a second crop. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 21(4), pp.123-138. [In Persian].
- Sachdev, S., Ansari, S.A., Ansari, M.I., Fujita, M., and Hasanuzzaman, M. 2021.** Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants (Basel)*, 11;10(2):277. doi: 10.3390/antiox10020277
- Safari, M., Khajouinejad, G.R., Maghsoudi Moud, A.A., and Mohammadinejad, Gh. 2018.** Effect of different rates and application methods of super-absorbent polymer in saffron cultivation under different irrigation levels. *Journal of Saffron Research*, 5(2), pp.231-246. doi: 10.22077/jsr.2017.799.1031
- Sairam, R.K., and Srivastava, G.C. 2001.** Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.): variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186(1), pp.63-70. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00461.x>
- Sepehri, S., Abdoli, S., and Asgari Lajayer, B. 2023.** Changes in phytochemical properties and water use efficiency of peppermint (*Mentha piperita* L.) using superabsorbent polymer under drought stress. *Scientific Reports*, 13, 21989. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49452-z>
- Smagin, A., Sadovnikova, N., and Nikolaeva, E. 2014.** Thermodynamic analysis of the effect of strongly swelling polymer hydrogels on the physical state of soil and sediment samples. *Eurasian Soil Science*, 47(2), pp.78-88. <https://doi.org/10.1134/S1064229314020100>
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., and Chen, S. 2021.** Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7, 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yang, Y., Nan, R., Mi, T., Song, Y., Shi, F., Liu, X., Wang, Y., Sun, F., Xi, Y., and Zhang, C. 2023.** Rapid and nondestructive evaluation of wheat chlorophyll under drought stress using hyperspectral imaging. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5825. <https://doi.org/10.3390/ijms24065825>
- Yu, J., Shi, J.G., Ma, X., Dang, P.F., Yan, Y.L., Mamedov, A.I., Shainberg, I., and Levy, G.J. 2017.** Superabsorbent polymer properties and concentration effects on water retention under drying conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 81, pp.889–901. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.07.0231>
- Zia, R., Nawaz, M.S., Siddique, M.J., Hakim, S., and Imran, A. 2021.** Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, 242, 126626. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>
- Zia-ur-Rehman, M., Anayatullah, S., Irfan, E., Hussain, S.M., Rizwan, M., Sohail, M.I., Jafir, M., and Alharby H.F. 2023.** Nanoparticles assisted regulation of oxidative stress and antioxidant enzyme system in plants under salt stress: A review. *Chemosphere*, 314, 137649. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137649>