

Original article

Evaluation of the effect of seed pretreatment and foliar application of nutrients on the physiological characteristics and yield of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress

Abdolreza Amiri Bidesheki¹, Mohammadreza Yavarzadeh^{1*}, Morteza Eshraghi-Nejad², Mohammad Mehdi Akbarian¹

1. Department of Agriculture, Bam.C., Islamic Azad University, Bam, Iran

2. Crop and Horticultural Science Research Department, Southern Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Jiroft, Iran

Received 30 April 2025; Revised 29 July 2025; Accepted 13 August 2025

Extended abstract

Introduction

Medicinal and aromatic plants, especially cumin (*Cuminum cyminum* L.), face significant productivity challenges due to increasing drought stress in arid regions. Water scarcity, particularly during critical growth stages, disrupts photosynthesis and pigment synthesis, leading to substantial yield losses. While irrigation management is essential, integrating agro-technical strategies such as seed priming and foliar applications has emerged as a promising way to enhance stress tolerance. Seed priming with osmotic agents like polyethylene glycol (PEG) and the foliar application of micronutrients or plant growth regulators (e.g., putrescine) can mitigate drought impacts by maintaining metabolic functions and nutrient uptake. However, the combined effects of different irrigation regimes, seed priming methods, and foliar treatments on the physiological and yield components of cumin remain poorly understood. Therefore, this study aimed to evaluate the interaction between irrigation timing, seed priming, and foliar application of nano-chelated iron, zinc, and putrescine on the physiological traits and yield of cumin in Jiroft, southern Iran.

Materials and methods

A two-year study (2022–2023) in Jiroft, southern Iran, explored strategies to mitigate drought impacts on cumin by evaluating the effects of seed priming and foliar nutrient application. The experiment utilized a split factorial design within a randomized complete block framework, testing three irrigation regimes (full irrigation, irrigation termination after flowering, and irrigation termination after seed formation), three seed priming methods (control, distilled water, polyethylene glycol), and four foliar nutrient treatments (control, nano-chelated iron, nano-chelated zinc, putrescine).

Results and discussion

Increased rainfall in the second year improved key physiological and yield parameters, including a 5.5% rise in relative water content (RWC), a 27.7% increase in chlorophyll *a**, 17.8% more umbels per plant, and a 6.6% boost in seed yield compared to the first year. However, drought stress induced by early irrigation termination severely reduced performance. Terminating irrigation after flowering caused the most significant declines: a 44% drop in RWC, 20% and 28% reductions in chlorophyll *a** and *b**, respectively, and a 27.7% decrease in carotenoids. Yield-related traits were equally affected, with 18.4% fewer umbels per plant, 24% fewer seeds per umbel, 22.6% lower thousand-seed weight, and a 37% reduction in seed yield compared to fully irrigated plants. Irrigation cessation after seed formation also impaired yields but to a lesser extent, underscoring the critical sensitivity of the flowering stage to water

* Corresponding author: Mohammadreza Yavarzadeh; E-Mail: Yavarzadehmo87@gmail.com

scarcity. Seed priming and foliar nutrient applications emerged as effective countermeasures. Polyethylene glycol (PEG) priming outperformed distilled water, increasing chlorophyll *a* by 17%, umbels per plant by 23%, and seed yield by 2% compared to non-primed controls. Foliar sprays of nano-chelated iron, zinc, or putrescine further enhanced resilience, elevating chlorophyll *a* by 40%, RWC by 14.5%, and seed yield by 10%. Nano-chelated micronutrients demonstrated particular efficacy, likely due to improved nutrient absorption under stress. These interventions also boosted biological yield (10–20%) and stabilized plant water status, essential for maintaining metabolic functions during drought.

Conclusion

The findings emphasize the necessity of maintaining irrigation during flowering, the most drought-sensitive growth stage for cumin, as water scarcity at this phase disrupts photosynthesis, pigment synthesis, and seed development, leading to irreversible yield losses. Integrating agro-technical strategies such as PEG-based seed priming and foliar application of nano-micronutrients or putrescine can mitigate these effects. PEG priming enhances seed vigor and stress tolerance, while foliar nutrients compensate for reduced root uptake under drought, directly supporting chlorophyll synthesis and osmotic regulation. For farmers in arid regions like Jiroft, the study recommends prioritizing irrigation during flowering to safeguard yield potential, adopting seed priming (preferably with PEG) to improve drought resilience, and applying foliar sprays of nano-chelated iron/zinc or putrescine during critical growth stages to enhance physiological efficiency. These strategies not only address immediate drought challenges but also contribute to long-term agricultural resilience, aligning with global demands for sustainable production of medicinal plants. By combining moisture conservation, seed priming, and targeted nutrient management, cumin productivity can be stabilized even in water-limited environments, ensuring a reliable supply of this high-value crop.

Keywords: Chlorophyll, Polyethyleneglycol, Putrescine, Relative water content, Thousand grain weight

ارزیابی اثر پیش تیمار بذر و محلول پاشی عناصر مغذی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) در سطوح آبیاری

عبدالرضا امیری بیدشکی^{۱*}، محمدرضا یاورزاده^{۱*}، مرتضی اشراقی نژاد^۲، محمد مهدی اکبریان^۱

۱. گروه کشاورزی، واحد بوم، دانشگاه آزاد اسلامی، بوم، ایران

۲. بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: پلی اتیلن گلیکول پوترسین کلروفیل محتوی نسبی آب وزن هزار دانه	با هدف ارزیابی پیش تیمار بذر و محلول پاشی عناصر مغذی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد گیاه دارویی زیره سبز، آزمایشی به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار طی سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در جنوب استان کرمان، جیرفت، انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل آبیاری در سه سطح (شاهد، قطع آبیاری بعد از مراحل گلدهی و تشکیل دانه) در کرت‌های اصلی، پیش تیمار بذر در سه سطح (شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و پلی اتیلن گلیکول) و محلول پاشی عناصر مغذی در چهار سطح (شاهد، نانو کلات آهن و روی و پلی آمین پوترسین) در کرت‌های فرعی بود. نتایج نشان داد که قطع آبیاری در مراحل بعد از گلدهی و تشکیل دانه منجر به کاهش ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد زیره سبز شد و بیشترین اثر منفی مربوط به قطع آبیاری در مرحله بعد از گلدهی بود، به طوری که در این مرحله ۴۴ درصد محتوی نسبی آب، ۲۰ درصد کلروفیل a، ۲۸ درصد کلروفیل b، ۲۷/۷ درصد کاروتنوئید، ۱۸/۴ درصد تعداد چتر، ۲۴ درصد تعداد دانه در چتر، ۲۲/۶ درصد وزن هزار دانه، ۱۲ درصد عملکرد زیستی و ۳۷ درصد عملکرد دانه نسبت به شاهد کاهش یافت. پیش تیمار بذر و محلول پاشی عناصر مغذی در مقایسه با عدم کاربرد آنها منجر به افزایش به ترتیب ۱۰ و ۱۴/۵ درصدی محتوی نسبی آب، ۱۷ و ۴۰ درصدی کلروفیل a، ۲۳ و ۲۴/۶ درصدی تعداد چتر، ۱۰ و ۲۰ درصدی عملکرد زیستی و دو و ۱۰ درصدی عملکرد دانه در زیره سبز شد. در مجموع، اجتناب از کاهش مقدار آب در دسترس گیاه در زمان گلدهی و پیش تیمار، به ویژه پلی اتیلن گلیکول نسبت به آب مقطر و کاربرد نانو کلات عناصر ریزمغذی و پوترسین، جهت افزایش رشد و عملکرد زیره سبز در جیرفت پیشنهاد می‌شود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲	

مقدمه

کشور ایران در منطقه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است. از این رو، خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی در ایران است که تولید کشاورزی را با محدودیت مواجه می‌کند (Qavidel et al., 2023). پیچیدگی تنش خشکی و غیرقابل پیش‌بینی بودن واکنش گیاه، به دلیل برهم‌کنش عوامل محیطی با عوامل زیستی و غیرزیستی، تنش خشکی را به یکی از پرچالش‌ترین تنش‌هایی که گیاهان با آن روبرو هستند، تبدیل کرده است. گیاهان در مواجهه با تنش خشکی، طیفی از راهکارهای سازگاری جهت مقابله با کمبود موقت یا

دائمی آب توسعه می‌دهند که شامل راهکارهای مولکولی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی است (Wei et al., 2024). بسته شدن روزنه‌ها یکی از اولین واکنش‌های گیاه به کمبود آب در خاک گزارش شده است که کاهش فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای، فعالیت سامانه فتوسنتزی و محتوی کلروفیل را به همراه دارد (Qiao et al., 2024).

یکی از راهکارهای اقتصادی و مؤثر جهت افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی، استفاده از پیش تیمار بذر است که منجر به بهبود استقرار گیاهچه، استفاده مطلوب از عوامل

روی گزارش شد (Yazdani Cham Heidari et al., 2016). در پژوهشی دیگر گزارش شد که در راستای کاربرد رویکردهای مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست، جهت کاهش اثر منفی تنش کم‌آبی در گیاهان دارویی با تقاضای بالا، پلی آمین‌ها از قبیل پوترسین تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد محصول دارند. این پژوهشگران بیان کردند که محلول‌پاشی پوترسین بر گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis*) در شرایط تنش خشکی با اثر بر ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، مولکولی و بیوشیمیایی، امکان حفظ متعادل آب را فراهم کرده و با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی منجر به فتوسنتز کارآمد و محدودیت تنش اکسیداتیو می‌شود (Mohammadi-Cheraghabadi et al., 2024).

زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) گیاهی یک‌ساله از تیره چتریان و دارای اندام‌های مختلف معطر است. این گیاه یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی در کشور است که در درمان بیمارهای مختلفی از قبیل اسپاسم معده و تقویت دستگاه گوارش کاربرد دارد. اسانس زیره سبز به دلیل ویژگی آنتی‌اکسیدانی و ضدباکتریایی در صنایع غذایی، بهداشتی و آرایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ashouri et al., 2024). افزون بر این، زیره سبز به دلیل اشتغال‌زایی و صادراتی بودن نقش مهمی در ارزآوری برای کشور دارد (Rivandi et al., 2020). همچنین، زیره سبز یکی از گیاهانی است که به دلیل دوره رشد کوتاه (۱۰۰-۱۲۰ روز)، نیاز آبی پایین و ارزش اقتصادی بالا از قابلیت فراوانی جهت کشت در مناطق گرم و خشک برخوردار است (Molla Filabi and Esfandiar, 2018). با توجه به مزایای زیره سبز، این گیاه از دیرباز مورد توجه کشاورزان در استان کرمان قرار داشته است. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی پیش تیمار بذر و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی و پوترسین بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و عملکردی زیره سبز در شرایط مختلف رطوبتی در شهرستان جیرفت، انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در جنوب استان کرمان، جیرفت، روستای جبال بارز، با مختصات جغرافیایی $28^{\circ} 56' 28''$ شمالی و $61^{\circ} 58'$ شرقی طی سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ اجرا شد. آزمایش به صورت اسپلینت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی صورت گرفت که ویژگی‌های آب‌وهوایی دوره رشد

محیطی، رشد سریع گیاهچه و افزایش کمی و کیفی عملکرد می‌شود. پیش تیمار بذر در مزرعه فناوری است که توسط آن بذرها قبل از کشت در آب و یا محلول‌های حاوی عناصر مختلف برای مدت معینی خیسانده شده و سپس، به طور سطحی خشک می‌شوند. گزارش شده است که گیاهان پیش تیمار شده در مقایسه با گیاهان شاهد، در زمان کوتاه‌تری سامانه ریشه‌ای خود را گسترش می‌دهند و با بهبود جذب آب و مواد غذایی و افزایش سطح برگ، سریع‌تر به مرحله تولید مواد فتوسنتزی می‌رسند (Khalequzzaman et al., 2023).

اختلال در تعادل عناصر تغذیه‌های درون گیاه یکی دیگر از آسیب‌های ناشی از تنش خشکی است. در این شرایط فراهم‌سازی مواد مغذی توسط ریشه محدود می‌شود؛ بنابراین، جهت مقابله با این مشکل می‌توان عناصر غذایی را به وسیله محلول‌پاشی در اختیار گیاه قرار داد، چرا که کمبود عناصر ریزمغذی اغلب می‌تواند جذب سایر عناصر دیگر را محدود کند (Alipour and Zahedi, 2018)، کاربرد ریزمغذی‌ها در شرایط تنش خشکی منجر به کاهش اثر سوء تنش بر گیاهان زراعی می‌شود (Arabpour et al., 2023). در سال‌های پیشین، کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد از قبیل پلی آمین‌ها جهت کاهش اثر تنش‌های محیطی در گیاهان زراعی مورد توجه قرار گرفته است. پلی آمین‌ها در فرایندهای فیزیولوژیک فراوانی شامل رشد و نمو گل و میوه، پیری برگ و واکنش به تنش‌های زیستی و غیرزیستی محیطی مؤثر هستند. پوترسین یکی از ترکیب‌های پلی آمینی است که در حفظ یکپارچگی و بقای غشای سیتوپلاسمی و اندامک‌های سلولی در تنش خشکی نقش مهمی را بر عهده دارد (Mohseni Mohammadjanloo et al., 2021).

عباسی‌نژاد و همکاران (Abbasi-Nejad et al., 2009) با ارزیابی تاریخ کاشت با استفاده از پیش تیمار با آب مقطر و پلی‌اتیلن گلایکول بر بذره‌های نخود (*Cicer arietinum*) گزارش کردند که بذره‌های پیش تیمار شده نسبت به شاهد در تمامی تاریخ‌های کاشت از عملکرد دانه بیشتری برخوردار شدند. در بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد زیره سبز تحت تأثیر محلول‌پاشی آهن و روی، نتایج نشان داد که افزایش تنش خشکی منجر به کاهش ارتفاع بوته، تعداد چتر در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد زیستی و دانه شد. درحالی‌که محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی، ویژگی‌های بیان شده را افزایش داد. بیشترین عملکرد دانه نیز از محلول‌پاشی

گیاه در جدول ۱ ارائه شده است. پیش از شروع آزمایش از خاک مزرعه در عمق صفر تا ۳۰ سانتیمتری نمونه برداری صورت گرفت که برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

تیمارهای آزمایش شامل سطوح آبیاری در سه سطح آبیاری تا زمان رسیدگی به عنوان شاهد، قطع آبیاری بعد از مراحل گلدهی (۶۵ روز بعد از سبز شدن تا پایان رسیدگی) و پر شدن دانه (۷۴ روز بعد از سبز شدن تا پایان رسیدگی) به عنوان عامل اصلی، پیش تیمار بذرها در سه سطح (شاهد، پیش تیمار با پلی اتیلن گلیکول پنج درصد و آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت) و تیمارهای محلول پاشی عناصر ریزمغذی در چهار سطح (شاهد، نانو کلات آهن و روی (شش میلی گرم در لیتر) و پوترسین (یک میلی مولار) در کرت‌های فرعی بود. لازم به ذکر است که آبیاری کرت‌ها بر اساس تشت تبخیر کلاس [۱.۱-]

A انجام شد. پس از رسیدن زمان آبیاری باتوجه به تیمارهای تنش میزان آب مصرفی بر اساس تشتک تبخیر کلاس A محاسبه شد (Allen et al., 1998).

$$ET_o = KP \times EPan \quad [1]$$

که در آن ET_o تبخیر و تعرق گیاه پایه بر حسب میلی متر در روز، KP ضریب تشتک که در آزمایش‌های مزرعه‌ای ۰/۶۸ در نظر گرفته می‌شود. میزان تبخیر از سطح تشتک کلاس A بر حسب میلی متر در روز و سپس آب مصرفی گیاه موردنظر با استفاده از فرمول زیر:

$$ET_c = ET_o \times KC \quad [2]$$

که در آن ET_c آب مصرفی گیاه موردنظر بر حسب میلی متر در روز و KC فاکتور گیاهی از روش آلن و همکاران (Allen et al., 1998) از کتاب FAO محاسبه شد و بر اساس دوره رشد متغیر بود.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های آب‌وهوایی دوره رشد گیاه طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 1. Some climatic characteristics during the plant growth period in the years 2023-2024

ماه‌های سال ۱۴۰۱	Months 2023	Min Temperature کمینه دما	Max Temperature بیشینه دما	Min Relative Humidity کمینه رطوبت نسبی	Max Relative Humidity بیشینه رطوبت نسبی	Rainfall مقدار بارندگی	Sunlight Hours ساعات آفتابی
		°C		%		mm	
آبان	November	10.7	29.9	15	59	0.9	268.2
آذر	December	7.9	23.4	28	79	1.6	218.6
دی	January	1.9	20.6	15	66	14.5	267.5
بهمن	February	6.0	25.6	14	64	0	267
جمع	Sum	26.5	99.5	72	268	17	1021.3
میانگین	Mean	6.6	24.8	18	67	-	255.3
ماه‌های سال ۱۴۰۲	Months 2024						
آبان	November	13.0	28.4	20	64	1.2	252.6
آذر	December	8.1	24.3	24	75	20.1	244.7
دی	January	8.5	20.2	40	92	27.8	181.1
بهمن	February	7.2	22.5	24	87	0	248
جمع	Sum	36.8	95.4	108	318	49.1	926.4
میانگین	Mean	9.2	23.85	27	79.5	-	231.6

جدول ۲. برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک قبل از اعمال تیمارها

Table 2. Some physicochemical properties of soil before treatment applications

Soil Depth عمق خاک	Soil Texture بافت خاک	Electrical Conductivity هدایت الکتریکی	pH اسیدیته	Organic Carbon کربن آلی	Available Phosphorus فسفر قابل استفاده	Available Potassium پتاسیم قابل استفاده	Available Fe آهن	Available Zn روی
cm		dS·m ⁻¹		%	mg·kg ⁻¹		Ppm	
0-30	Loam	1.77	7.80	0.35	8.5	240	8.3	1.5

کلروفیل b (Chl. b) و کاروتنوئید (Car). مطابق رابطه‌های زیر به دست آمد.

$$Chl.a = 12.25(A663 \cdot 6) - 2.55(A646 \cdot 6) \times \frac{V}{1000} \quad [3]$$

$$Chl.b = 20.31(A646 \cdot 6) - 4.91(A663 \cdot 6) \times \frac{V}{1000} \quad [4]$$

$$Car. = [(1000(A470) - 3.27(Chl. a) - 104(Chl. b))] \quad [5]$$

A: طول موج جذب اسپکتروفتومتر است.

جهت اندازه‌گیری محتوی نسبی آب برگ‌ها، در مرحله گلدهی، از جوان‌ترین برگ‌ها که به طور کامل رشد یافته و سالم بودند، نمونه‌برداری صورت گرفت و وزن تر با ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سپس، برگ‌ها به مدت شش ساعت در دمای اتاق و نور کم درون آب مقطر، جهت محاسبه وزن اشباع غوطه‌ور و وزن اشباع برگ‌ها تعیین شد. در نهایت، برگ‌ها در آون ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۴۸ ساعت خشک و دوباره توزین شدند و محتوی نسبی آب برگ‌ها با استفاده از رابطه ۶ به دست آمد (Sánchez et al., 1998).

$$RWC (\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \quad [6]$$

FW، DW و TW: به ترتیب وزن تر، وزن خشک و وزن اشباع برگ هستند

پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطمینان از نرمال بودن آنها و همچنین، همگنی سال‌های آزمایش با استفاده از آزمون بارتلت، تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SAS v.9.1 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار اکسل و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با نرم‌افزار R (۳.۵.۲) صورت گرفت.

نتایج و بحث

مطابق با نتایج تجزیه واریانس مرکب، اثر سال‌های آزمایش، سطوح آبیاری، پیش تیمار بذر و محلول‌پاشی عناصر بر ویژگی‌های فیزیولوژیک، اجزای عملکرد و عملکرد زیره سبز معنی‌دار شد. برهم‌کنش سال $\times$ سطوح آبیاری بر محتوی کلروفیل b ، کاروتنوئید و وزن هزار دانه در سطح یک درصد و بر عملکرد زیستی و شاخص برداشت در سطح پنج درصد از نظر آماری معنی‌دار بود. درحالی‌که برهم‌کنش سال $\times$ پیش تیمار تنها بر وزن هزار دانه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. برهم‌کنش سطوح آبیاری $\times$ پیش تیمار نیز بر تعداد دانه در چتر، وزن هزار دانه (در سطح یک درصد) و بر عملکرد دانه (در سطح پنج درصد) معنی‌دار بود. نتایج همچنین، نشان داد

جهت کنترل و اندازه‌گیری دقیق آب از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد. برای محاسبه حجم آب موردنیاز هر کرت مقدار تبخیر از تشتک تبخیر برای هر کرت مربوطه در ضریب تشتک و سپس در فاکتور گیاهی ضرب تا تبخیر و تعرق پتانسیل به دست آید و در نهایت در سطح هر کرت ضرب شده و حجم آبیاری محاسبه شده از طریق کنتور اعمال گردید. راندمان آبیاری ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. نیاز آبی کل فصل رشد در تیمار شاهد ۴۷۰ میلی‌متر (معادل ۴۷۰ مترمکعب در هکتار) بود.

تیمارهای تنش به شرح زیر اجرا شد. شاهد: آبیاری تا پایان رسیدگی (۱۰۰ روز پس از سبز شدن). قطع آبیاری پس از گلدهی: آبیاری تا ۶۵ روز پس از سبز شدن (اتمام گلدهی) (آبیاری دریافتی: ۳۱۲ میلی‌متر). قطع آبیاری پس از پر شدن دانه: آبیاری تا ۷۴ روز پس از سبز شدن (آبیاری دریافتی: ۳۵۵ میلی‌متر). جهت پیش تیمار بذر، پس از ضدعفونی آنها با هیپوکلرید سدیم پنج درصد به مدت ۱۰ دقیقه، بذرهای سه بار با آب مقطر شستشو داده شد و تمامی ظروف موردنیاز در اتوکلاو (۱۲۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت) استریل شد. سپس، بذرهای تیمارهای موردنظر پیش تیمار شده و تا ۴۸ ساعت قبل از کشت در دمای آزمایشگاه تا رسیدن به محتوی اولیه رطوبت خشک شدند.

کشت بذرهای در هر دو سال در اواخر آبان‌ماه در کرت‌هایی با چهار ردیف به طول چهار متر صورت گرفت. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۰ سانتیمتر و فاصله بوته روی ردیف کاشت شش سانتیمتر بود. قبل از پاشی به خاک کود دامی داده شد و توسط شخم عمیق با خاک مخلوط گردید. گیاهان در چهار تا شش‌برگی تنک شده و در طی دوره رشد علف‌های هرز به‌صورت دستی حذف گردید. محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی دو بار در طی دوره رشد، بعد از مرحله ۱۰ برگی و در شروع رشد زایشی انجام شد.

پس از مرحله رسیدگی فیزیولوژیک بذرهای در اواخر بهمن‌ماه، از هر کرت آزمایشی تعداد پنج بوته به طور تصادفی انتخاب و تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر و وزن هزار دانه تعیین شد. عملکرد زیستی نیز با برداشت بوته‌ها از ۵/۰ مترمربع از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه به دست آمد. جهت سنجش محتوی کلروفیل و کاروتنوئید به ترتیب از روش (Porra, 2002; Lichtenthaler and Wellburn, 1983) استفاده شد که در نهایت، مقادیر کلروفیل a (Chl.a)

محتوی نسبی آب

بر اساس نتایج جدول ۵، محتوی نسبی آب در سال ۱۴۰۲، ۵/۵ درصد بیشتر از سال ۱۴۰۱ بود که این موضوع می‌تواند به مطلوب‌بودن شرایط آب‌وهوایی، به‌ویژه مقدار بارندگی طی دوره رشد، در سال دوم نسبت به سال اول مربوط باشد. گزارش شده است که شرایط آب‌وهوایی خشک منجر به افزایش مقدار تبخیر و تعرق از جامعه گیاهی شده که کاهش محتوی نسبی آب برگ را به دنبال دارد (Khayat Moghaddam et al., 2021).

که برهم‌کنش سال×سطوح آبیاری×پیش تیمار تنها بر وزن هزار دانه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. برهم‌کنش سال×محلول‌پاشی نیز تنها بر محتوی کلروفیل b و کاروتنوئید به ترتیب در سطح پنج و یک درصد از نظر آماری معنی‌دار بود. برهم‌کنش سطوح آبیاری×محلول‌پاشی بر مقدار کلروفیل b و وزن هزار دانه در سطح یک درصد و بر مقدار کاروتنوئید در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. برهم‌کنش پیش تیمار × محلول‌پاشی، سال × سطوح آبیاری × محلول‌پاشی، سطوح آبیاری × پیش تیمار × محلول‌پاشی و سال × سطوح آبیاری × محلول‌پاشی نیز تنها بر وزن هزار دانه در سطح یک درصد اثر معنی‌دار نشان داد (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳. تجزیه واریانس مرکب سطوح آبیاری، پیش تیمار بذر و محلول‌پاشی عناصر مغذی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و عملکرد زیره سبز طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲

Table 3. Combined analysis of variance for irrigation levels, seed pre-treatment, and foliar application of nutrients on physiological traits and yield of cumin during the years 2023-2024

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوی نسبی آب	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید
		df	Relative Water Content	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid
سال (Y)	Year (Y)	1	625**	1621.4**	2699.4**	4817.6**
تکرار × سال	Replication × Year	4	34.2	214.4	10	85.4
آبیاری (I)	Irrigation (I)	2	868.8**	1638.5**	2756.8**	13108**
I × Y		2	33 ^{ns}	8.2 ^{ns}	113**	293.5**
خطای اصلی	Main Error	8	27.3	7.2	37.4	7
پیش تیمار (P)	Pre-treatment (P)	2	662.8**	247.8**	378.7**	2033**
P × Y		2	5.4 ^{ns}	5.4 ^{ns}	10 ^{ns}	29 ^{ns}
محلول‌پاشی (F)	Foliar Application (F)	3	844.2**	666**	2189**	1984**
F × Y		3	0.31 ^{ns}	1.8 ^{ns}	127.8*	150.2**
P × I		4	40.2 ^{ns}	1.4 ^{ns}	13 ^{ns}	25.6 ^{ns}
P × I × Y		4	1.6 ^{ns}	4.4 ^{ns}	7 ^{ns}	29 ^{ns}
F × I		6	21 ^{ns}	13.6 ^{ns}	120.2**	52.3*
F × I × Y		6	2 ^{ns}	1 ^{ns}	3.7 ^{ns}	17 ^{ns}
F × P		6	2.7 ^{ns}	0.4 ^{ns}	4.7 ^{ns}	44 ^{ns}
F × P × Y		6	0.56 ^{ns}	5 ^{ns}	1.2 ^{ns}	11 ^{ns}
F × P × I		12	0.85 ^{ns}	1.7 ^{ns}	1.7 ^{ns}	2.2 ^{ns}
P × F × I × Y		12	0.84 ^{ns}	3.4 ^{ns}	0.8 ^{ns}	4.2 ^{ns}
خطا	Error	132	37.4	15.2	10.5	24.5
(%) CV	ضریب تغییرات		9.6	17	13.7	9.4

*، **، و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی‌دار است.

*, **, and ^{ns} indicate significance at the 5% and 1% probability levels and non-significance, respectively.

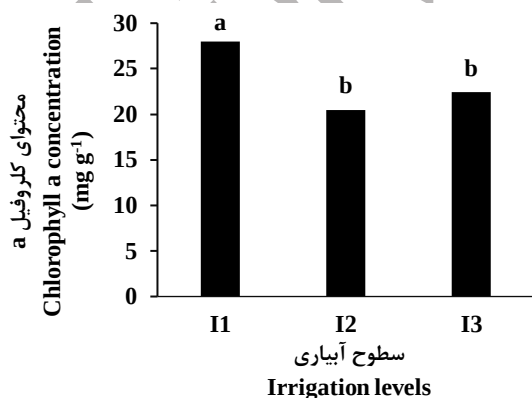
شدن دانه‌ها، ۴۴ و ۲۴/۵ درصد به ترتیب، محتوی نسبی آب برگ کاهش یافت (شکل ۱). محتوی نسبی آب برگ توانمندی گیاه در تحمل به تنش را نشان می‌دهد و کاهش

نتایج مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر محتوی نسبی آب برگ نیز نشان داد که بیشترین مقدار RWC در آبیاری شاهد به دست آمد که با قطع آبیاری پس از مرحله گلدهی و پر

گلایکول ۶۰۰۰ بر گیاه دارویی زنیان در شرایط تنش آبی، بیشترین ویژگی‌های رشدی و عملکردی مربوط به پیش تیمار بذرها با PEG بود (Malekzadeh and Fallah., 2016). در پژوهش آراسته و همکاران (Arasteh et al., 2020) افزایش محتوی نسبی آب برگ گیاه جعفری مکزیکی در محلول پاشی پوترسین با غلظت دو میلی‌مولار گزارش شد. همچنین، اصل محمدی و همکاران (Asl Mohammadi et al., 2021) افزایش محتوی نسبی آب برگ در گیاه آویشن باغی را با کاربرد محلول پاشی روی و آهن گزارش کردند.

کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها

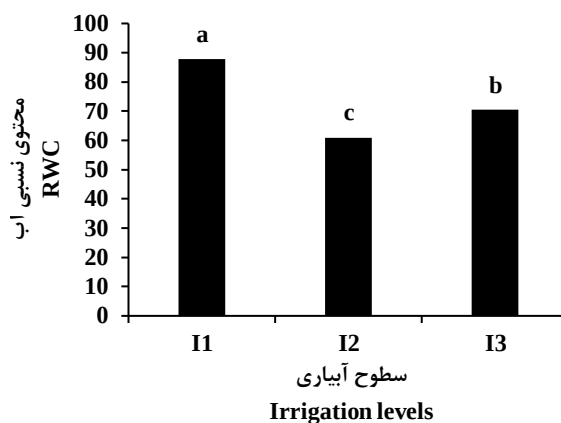
مطابق مقایسه میانگین، شرایط آب‌وهوایی مساعد در سال دوم، افزایش محتوی کلروفیل a، ۲۷/۲ درصد، را به دنبال داشت (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین سطوح آبیاری حاکی از کاهش محتوی کلروفیل a در قطع آبیاری بعد از مراحل گلدهی و پر شدن دانه بدون تفاوت، ۲۰ درصد، نسبت به تیمار بدون تنش داشت (شکل ۲). افزون بر این، نتایج جدول ۵، نشان داد که پیش تیمار بذر با آب مقطر و PEG و محلول پاشی گیاه با عناصر مغذی، بهبود محتوی کلروفیل a را در مقایسه با شاهد به دنبال دارد. محتوی کلروفیل a در اعمال پیش تیمار بذرهای زیره سبز، ۱۷ درصد بیشتر از تیمار شاهد بود. همچنین، محلول پاشی عناصر مغذی توانست ۴۰ درصد محتوی کلروفیل a را در مقایسه با شاهد افزایش دهد.



شکل ۲. مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر کلروفیل a. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 2. Comparison of the mean levels of irrigation on chlorophyll a. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

آن یکی از مهم‌ترین تغییرات گیاه در تنش خشکی است. کاهش RWC و بسته‌شدن روزنه‌ها اولین اثر خشکی بوده که به دنبال آن مقدار دی‌اکسیدکربن درون سلولی کاهش یافته و با اختلال در ساخت مواد پرورده و سوخت‌وساز برگ منجر به کاهش عملکرد می‌شود (Karimi Afshar et al., 2015).



شکل ۱. مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر محتوی نسبی آب برگ. I1؛ I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 1. Comparison of the mean irrigation levels on leaf relative water content. I1, I2, and I3: Represent control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

نتایج مقایسه میانگین پیش تیمار بذر حاکی از افزایش محتوی نسبی آب برگ در کاربرد روش‌های پیش تیمار نسبت به شاهد داشت. به‌طوری که هر دو تیمار به‌کاررفته در پژوهش، ۱۰ درصد بدون اختلاف با یکدیگر، RWC بیشتری را نشان دادند. نتایج همچنین، نشان داد که محلول پاشی گیاه با نانو کلات آهن، روی و پلی آمین پوترسین بدون تفاوت با یکدیگر، محتوی نسبی آب را در مقایسه با شاهد، ۱۴/۵ درصد، افزایش می‌دهد (جدول ۵). یکی از چالش‌های رشد گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، جوانه‌زنی و استقرار نامطلوب به دلیل کمبود رطوبت خاک است که به‌تبع، بر عملکرد و سایر ویژگی‌های رشدی گیاه اثر می‌گذارد. این در حالی است که بذرها پیش تیمار شده، خیلی سریع آب جذب کرده و با بهبود استقرار گیاه و افزایش تحمل به کمبود آب، افزایش عملکرد را به دنبال دارند (Tavassoli., 2021). مطابق با نتایج این پژوهش، در بررسی پیش تیمار با پلی اتیلن

جدول ۴. تجزیه واریانس مرکب سطوح آبیاری، پیش تیمار بذر و محلولپاشی عناصر مغذی بر ویژگیهای فیزیولوژیک و عملکرد زیره سبز طی سالهای ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 4. Combined analysis of variance for irrigation levels, seed pre-treatment, and foliar application of nutrients on physiological traits and yield of cumin during the years 2023-2024

عملکرد دانه Grain Yield	عملکرد زیستی Biological Yield	وزن هزار دانه Thousand- Seed Weight	تعداد دانه در چتر Number of Seeds per Umbel	تعداد چتر در بوته Number of Umbels per Plant	درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V
15875**	445101.6**	10**	5749.4**	305**	1	سال (Y) Year (Y)
2226.5	15626.5	0.015	1.3	4	4	تکرار × سال Replication × Year
179551**	314225.2**	3.2**	34164.7**	293**	2	آبیاری (I) Irrigation (I)
68.3 ^{ns}	31024*	0.11**	36.7 ^{ns}	8.7 ^{ns}	2	I × Y
376.3	3953.2	0.008	5.2	6.4	8	خطای اصلی Main error
79268.8**	117500.5**	1.3**	3462.3**	286.6**	2	پیش تیمار (P) Pre-treatment (P)
103 ^{ns}	230 ^{ns}	0.2**	150*	4.8 ^{ns}	2	P × Y
57977**	32503.4*	1.8**	2323**	137**	3	محلولپاشی (F) Foliar application (F)
65 ^{ns}	3145.7 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	2.3 ^{ns}	4 ^{ns}	3	F × Y
448.6 ^{ns}	5282 ^{ns}	0.05**	116.4**	3 ^{ns}	4	P × I
74.2 ^{ns}	5436 ^{ns}	0.09**	13.8 ^{ns}	4 ^{ns}	4	P × I × Y
419.2 ^{ns}	1079.5 ^{ns}	0.04**	142.4**	2 ^{ns}	6	F × I
7.8 ^{ns}	106.2 ^{ns}	0.09**	6.7 ^{ns}	0.63 ^{ns}	6	F × I × Y
793.3 ^{ns}	680 ^{ns}	0.09**	18.6 ^{ns}	3.6 ^{ns}	6	F × P
149 ^{ns}	25.2 ^{ns}	0.008 ^{ns}	2.8 ^{ns}	0.2 ^{ns}	6	F × P × Y
288.4 ^{ns}	698.8 ^{ns}	0.05**	24.7 ^{ns}	1.6 ^{ns}	12	F × P × I
43.8 ^{ns}	650.6 ^{ns}	0.04**	5 ^{ns}	0.73 ^{ns}	12	P × F × I × Y
483.6	8469.8	0.009	15.3	5.7	132	خطا Error
2/10	12.6	2.6	6	23		ضریب تغییرات (%) CV

*، ** و ^{ns} به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیرمعنی دار است.

*, **, and ^{ns} indicate significance at the 5% and 1% probability levels and non-significance, respectively.

b و پنج و ۲۲ درصد کاروتنوئید را به ترتیب نسبت به پیش تیمار با آب مقطر و شاهد افزایش داد. مطابق با نتایج این پژوهش، غلامی و همکاران (Gholami et al., 2021) اظهار کردند که اسموپرایمینگ نسبت به هیدروپرایمینگ با آب مقطر منجر به بهبود رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه کینوا شد. مقایسه میانگین برهم‌کنش سال × محلولپاشی بر مقدار کلروفیل b و کاروتنوئید نیز حاکی از افزایش مقادیر هر دو رنگیزه در کاربرد عناصر ریزمغذی و پوترسین در مقایسه با شاهد در هر دو سال آزمایش داشت و در تمامی سطوح محلولپاشی، میانگین کلروفیل b و کاروتنوئید در سال دوم بیشتر از سال اول بود. به‌طوری که کمترین محتوی کلروفیل و کاروتنوئید در تیمار شاهد در سال اول، به ترتیب ۵۰ و ۵۲/۶ درصد کاهش نسبت به محلولپاشی نانو کلات آهن،

بر اساس نتایج برهم‌کنش سال × سطوح آبیاری، مقدار کلروفیل b و کاروتنوئید در هر دو سال برای تیمار شاهد بیشترین مقدار بود. اگرچه، کاهش دسترسی گیاه به آب، محتوی کلروفیل b و کاروتنوئید را در هر دو سال با کاهش مواجه کرد، اما این کاهش در سال دوم به دلیل مطلوب بودن شرایط آب‌وهوایی کمتر از سال اول بود. بیشترین کاهش کلروفیل (۲۸ درصد) و کاروتنوئید (۲۷/۷ درصد) در قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی در سال اول نسبت به شرایط بدون تنش در همان سال ثبت شد (شکل‌های ۳ و ۴).

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵ و ۶، پیش تیمار بذر با آب مقطر و PEG محتوی کلروفیل b و کاروتنوئید را در گیاه زیره سبز نسبت به عدم کاربرد آنها افزایش داد. این در حالی بود که استفاده از PEG، هفت و ۲۱/۲ درصد کلروفیل

ثبت شد (شکل‌های ۷ و ۸). مطابق با برهم‌کنش سطوح آبیاری×محلول‌پاشی استفاده از کاربرد برگ‌ی عناصر در تمامی سطوح آبیاری محتوی دو رنگیزه را در مقایسه با عدم محلول‌پاشی افزایش داد. باین‌حال، بیشترین و کمترین مقادیر در سطوح مختلف محلول‌پاشی به ترتیب برای سطح بدون تنش و قطع آبیاری پس از مرحله گلدهی به دست آمد. قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و عدم محلول‌پاشی ۲۸ درصد کلروفیل b و ۳۰/۲ درصد کاروتنوئید را نسبت به کاربرد محلول‌پاشی در همان سطح آبیاری کاهش داد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

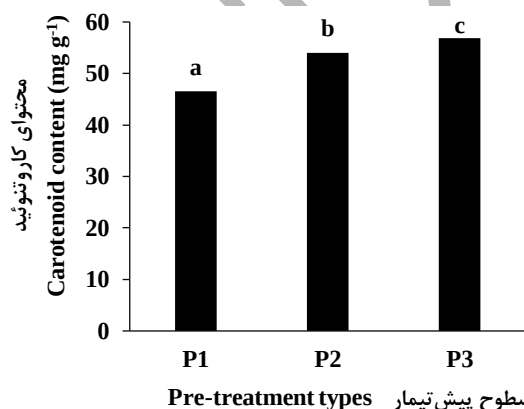
جدول ۵. مقایسه میانگین سال‌های آزمایش، پیش تیمار و محلول‌پاشی بر ویژگی‌های مورد مطالعه در زیره سبز

Table 5. Comparison of the means of experimental years, pre-treatment, and foliar application on the studied traits in cumin

Experimental years	سال‌های آزمایش	محتوی نسبی آب برگ		تعداد چتر در بوته	عملکرد زیستی	عملکرد دانه
		Leaf relative water content	کلروفیل a			
		%	Chlorophyll a	Number of umbels per plant	Biological yield	Grain yield
			mg·g ⁻¹		kg·ha ⁻¹	
2022	۱۴۰۱	61.8 ^b	2.20 ^b	14 ^b	2654.7 ^b	752.8 ^b
2023	۱۴۰۲	65.2 ^a	25.7 ^a	16.5 ^a	2831.5 ^a	802.7 ^a
Pre-treatment levels						
Control	شاهد	60 ^b	21 ^b	13 ^c	2533.6 ^c	812.0 ^b
Osmopriming	اسموپرایمینگ	64.3 ^a	23.3 ^a	16 ^a	2767.8 ^a	832.0 ^a
Hydropriming	هیدروپرایمینگ	66.0 ^a	24.6 ^a	14.7 ^b	2652.7 ^b	825.0 ^a
Foliar application levels						
سطوح محلول‌پاشی						
Control	شاهد	57.6 ^b	17.7 ^b	13 ^b	2354.2 ^c	752.0 ^b
Nano iron chelate	نانو کلات آهن	65.0 ^a	24.8 ^a	15.8 ^a	2566.8 ^b	827.5 ^a
Nano zinc chelate	نانو کلات روی	65.2 ^a	24.6 ^a	16.2 ^a	2594.3 ^b	830.4 ^a
Putrescine	پوترسین	66.0 ^a	24.8 ^a	16 ^a	2819.6 ^a	831.6 ^a

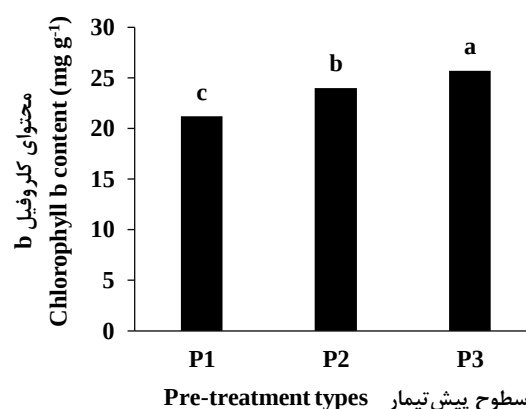
حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Common letters within each culoumn indicate no significant differences among means at the 5% probability level.



شکل ۴. مقایسه میانگین سطوح پیش تیمار بر کاروتنوئید. P1، P2 و P3: به ترتیب آبیاری شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و PEG. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 4. Comparison of the mean levels of pre-treatment on carotenoid. P1, P2, and P3: Representing control irrigation, pre-treatment with distilled water, and PEG. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

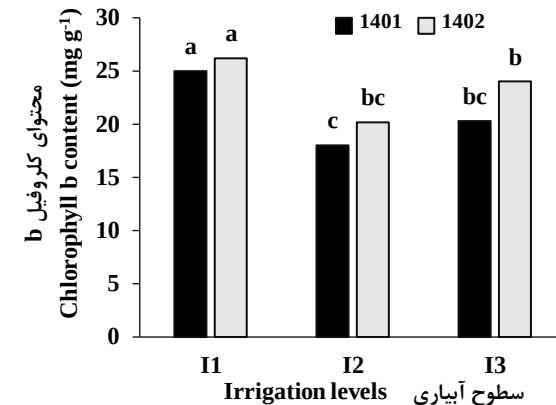
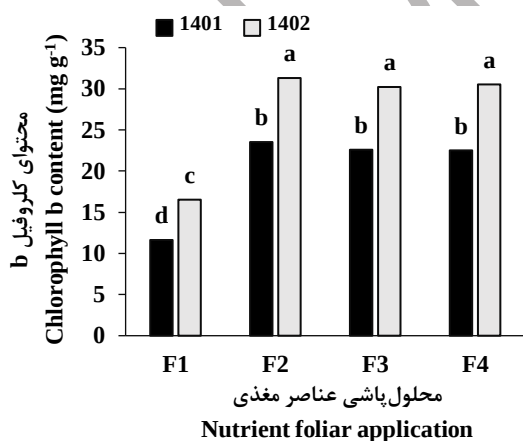


شکل ۳. مقایسه میانگین سطوح پیش تیمار بر کلروفیل b. P1، P2 و P3: به ترتیب آبیاری شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و PEG. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 3. Comparison of the mean levels of pre-treatment on chlorophyll b. P1, P2, and P3: Representing control irrigation, pre-treatment with distilled water, and PEG. Common letters within each group

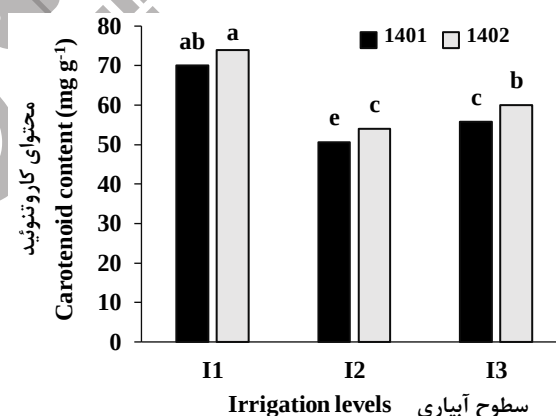
تخریب کلروپلاست‌ها و کاهش محتوی کلروفیل و همچنین، بازداری از تولید آن و یا در اثر تجزیه پروتئین‌ها و در نتیجه، افزایش آمینواسیدها از قبیل پرولین، کاهش مقدار کلروفیل را به دنبال دارد (Khayat Moghaddam et al., 2021). کاهش در مقدار کاروتنوئید نیز در شرایط تنش خشکی می‌تواند به دلیل کندی ساخت و یا تجزیه سریع باشد که به علت افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و به تبع آن تنش اکسیداتیو ایجاد می‌شود. تنش اکسیداتیو با پراکسیداسیون لیپیدها به غشای سلولی آسیب می‌رساند و بسیاری از اجزای حیاتی سلول گیاه از قبیل کاروتنوئیدها را تخریب می‌کند (Malekzadeh and Fallah., 2016).

در شرایط کمبود رطوبت کاهش کلروفیل به دلیل کاهش عناصر ریزمغذی خاک (به‌ویژه آهن و روی) رخ می‌دهد. از آنجایی که محتوی کلروفیل یکی از مهم‌ترین عواملی است که بر ظرفیت فتوسنتزی اثر دارد، کاربرد آهن و روی در شرایط تنش خشکی، مقدار کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی گیاه را افزایش داده و منجر به توسعه پوشش گیاهی، سطح برگ و عملکرد می‌شود (Sattar et al., 2022)؛ بنابراین، نتایج این پژوهش، با بررسی ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) مبنی بر افزایش محتوی رنگیزه‌های فتوسنتزی گندم در شرایط دیم مطابقت داشت.



شکل ۵. برهم‌کنش سال × سطوح آبیاری بر کلروفیل b: I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 5. Interaction of year × irrigation levels on chlorophyll b. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively. 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level



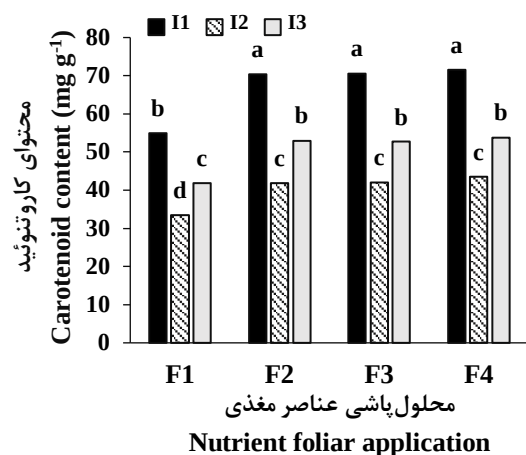
شکل ۶. برهم‌کنش سال × سطوح آبیاری بر کاروتنوئید. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 6. Interaction of year × irrigation levels on carotenoid. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively; 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

شکل ۷. برهم‌کنش سال × سطوح آبیاری بر کلروفیل b: F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 7. Interaction of year × irrigation levels on chlorophyll b. F1, F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

محتوی کلروفیل به‌عنوان یک معیار جهت ارزیابی اثر تنش‌های محیطی از قبیل تنش خشکی مطرح است که واکنش گیاه وابسته به گونه زراعی است. تنش خشکی با

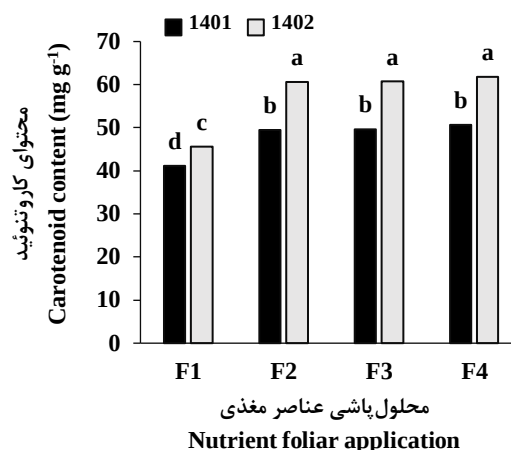


شکل ۱۰. برهم‌کنش سطوح آبیاری × محلول‌پاشی بر کاروتنوئید. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 10. Interaction of irrigation levels × foliar application on carotenoid. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively; F1, F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

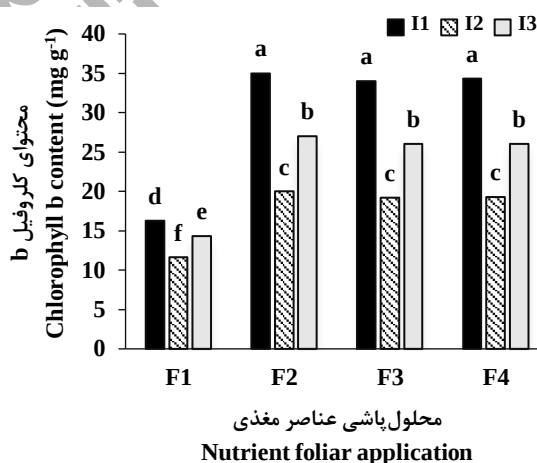
کاربرد پوترسین در شرایط تنش خشکی نیز با به تعویق‌انداختن پیری و کاهش ازدست‌رفتن کلروفیل، افزایش عملکرد گیاهان را به دنبال دارد. به‌طوری که محلول‌پاشی پوترسین با القای داخلی سیتوکنین، تحریک ساخت کلروفیل و تمایز کلروپلاست را منجر می‌شود (Mohseni Mohammadjanloo et al., 2021).

تعداد چتر در بوته، تعداد دانه در چتر و وزن هزار دانه
بر اساس نتایج مقایسه میانگین، تعداد چتر در بوته در سال دوم، ۱۷/۸ درصد بیشتر از سال اول تولید شد (جدول ۴). همچنین، با اعمال آبیاری شاهد، تعداد چتر به ترتیب ۱۸/۴ و ۱۲/۸ درصد بیشتر از قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و پر شدن دانه بود (شکل ۱۱). پیش تیمار با پلی‌اتیلن گلايگول و آب مقطر تعداد چتر را، ۲۳ و ۱۳ درصد به ترتیب، نسبت به شاهد افزایش دادند. محلول‌پاشی با نانو کلات آهن، روی و پلی آمین پوترسین نیز بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر، ۲۴/۶ درصد تعداد چتر بیشتری در مقایسه با شاهد تولید کردند (جدول ۵).



شکل ۸. برهم‌کنش سال × سطوح آبیاری بر کاروتنوئید. F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

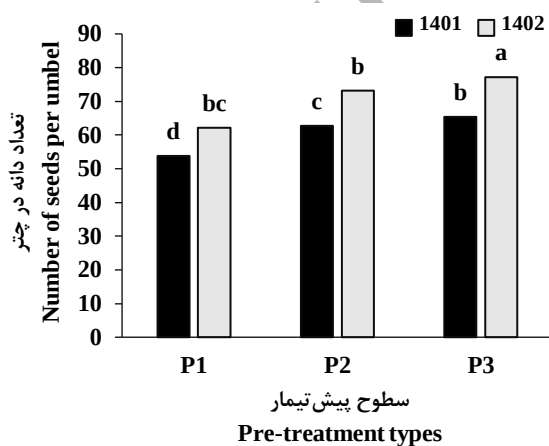
Fig. 8. Interaction of Year × Irrigation Levels on Carotenoid. F1, F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.



شکل ۹. برهم‌کنش سطوح آبیاری × محلول‌پاشی بر کلروفیل b. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

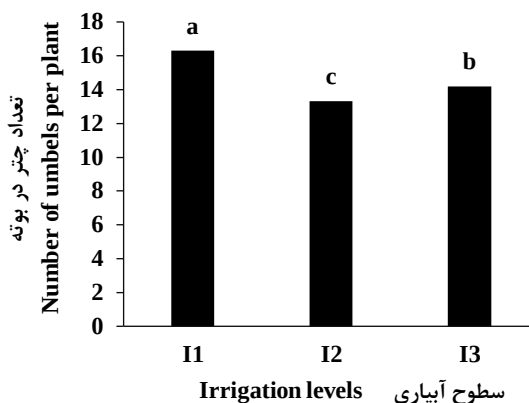
Fig. 9. Interaction of irrigation levels × foliar application on chlorophyll b. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively; F1, F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

به دست آمد و کمترین تعداد دانه در قطع آبیاری در مرحله گلدهی و بدون محلول پاشی مشاهده شد که با محلول پاشی ۵۰ درصد افزایش یافت (شکل ۱۴). نتایج برهم کنش سال × سطوح آبیاری × پیش تیمار × محلول پاشی بر وزن هزار دانه زیره سبز نیز نشان داد که به دلیل برخورداری از آب و هوای مطلوب در سال دوم، مقادیر وزن هزار دانه در تمامی سطوح تیماری به کاررفته در پژوهش، نسبت به سال اول افزایش داشت. افزون بر این، در هر دو سال، مرحله گلدهی حساس ترین مرحله به تنش خشکی بود و با قطع آبیاری بعد از گلدهی، وزن هزار دانه در تمامی تیمارها بیشترین کاهش را نشان داد. در نهایت، بیشترین مقدار در سال ۱۴۰۲ در تیمار بدون تنش آبی همراه با پیش تیمار با PEG و محلول پاشی پوترسین مشاهده شد که تفاوت اندکی با پیش تیمار با آب مقطر و محلول پاشی با نانو کلات آهن و روی داشت. تیمار قطع آبیاری بعد از گلدهی و عدم کاربرد پیش تیمار و محلول پاشی در سال ۱۴۰۱ نیز با ۲۲/۶ درصد کاهش نسبت به کاربرد تیمارها، کمترین مقدار را به خود اختصاص داد (شکل ۱۵).



شکل ۱۲. برهم کنش سال × محلول پاشی بر تعداد دانه. P1، P2 و P3: به ترتیب آبیاری شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و PEG. حروف مشترک در هر گروه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین میانگین ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 12. Interaction of year × foliar application on the number of seeds. P1, P2, and P3: Representing control irrigation, pre-treatment with distilled water, and PEG. 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

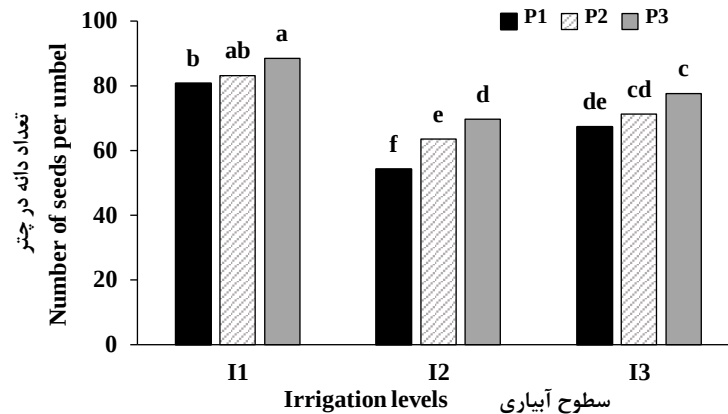


شکل ۱۱. مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر تعداد چتر در بوته. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه. حروف مشترک نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین میانگین ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 11. Comparison of the mean levels of irrigation on the number of umbels per plant. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively; Common letters indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

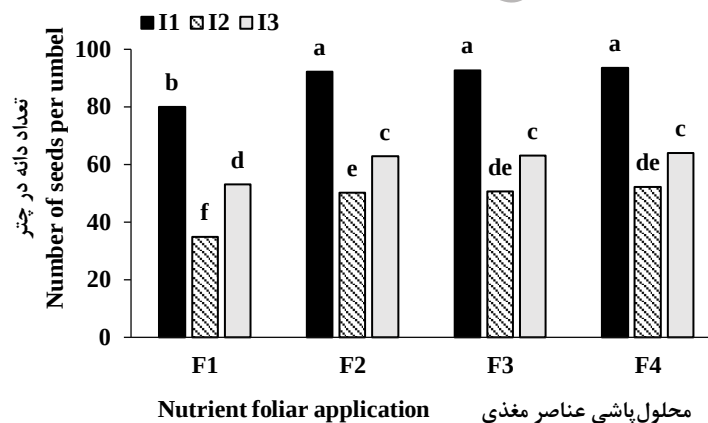
نتایج برهم کنش سال × پیش تیمار بر تعداد دانه در چتر حاکی از افزایش تعداد دانه در تمامی سطوح پیش تیمار در سال ۱۴۰۲ نسبت به سال ۱۴۰۱ داشت. افزون بر این، در هر دو سال پیش تیمار بذرها در مقایسه با شاهد، تعداد دانه را افزایش داد که این افزایش برای پیش تیمار با PEG بیشتر از پیش تیمار با آب مقطر بود. پیش تیمار با PEG در سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ به ترتیب ۲۱/۶ و ۲۴ درصد تعداد دانه را نسبت به شاهد افزایش داد (شکل ۱۲). بر اساس شکل ۱۳، تعداد دانه در چتر در تمامی سطوح آبیاری با کاربرد پیش تیمار نسبت به عدم کاربرد آن افزایش یافت و بیشترین مقدار برای کاربرد PEG در آبیاری شاهد به دست آمد. از آنجایی که در این پژوهش، حساس ترین مرحله به تنش کمبود آب، مرحله گلدهی بود، کمترین مقادیر در هر سه سطح پیش تیمار در قطع آبیاری بعد از گلدهی زیره سبز مشاهده شد در حالی که پیش تیمار با PEG و آب مقطر در قطع آبیاری بعد از گلدهی به ترتیب ۲۸/۵ و ۹/۵ درصد، تعداد دانه را نسبت به عدم پیش تیمار بذرها افزایش داد.

نتایج برهم کنش سطوح آبیاری × محلول پاشی نشان داد که با محلول پاشی عناصر مغذی در هر سه سطح آبیاری، تعداد دانه در چتر زیره سبز از روندی افزایشی در مقایسه با عدم محلول پاشی برخوردار است. بیشترین مقدار در کاربرد عناصر مغذی در سطح شاهد، ۱۶/۸ درصد بیشتر از عدم محلول پاشی



شکل ۱۳. برهم‌کنش سطوح آبیاری × پیش تیمار بر تعداد دانه. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه؛ P1، P2 و P3: به ترتیب آبیاری شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و PEG. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 13. Interaction of irrigation levels × pre-treatment on the number of seeds. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation; P1, P2, and P3: Representing control irrigation, pre-treatment with distilled water, and PEG. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.



شکل ۱۴. برهم‌کنش سطوح آبیاری × محلول‌پاشی بر تعداد دانه. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه؛ F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 14. Interaction of irrigation levels × foliar application on the number of seeds. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation, respectively; F1, F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

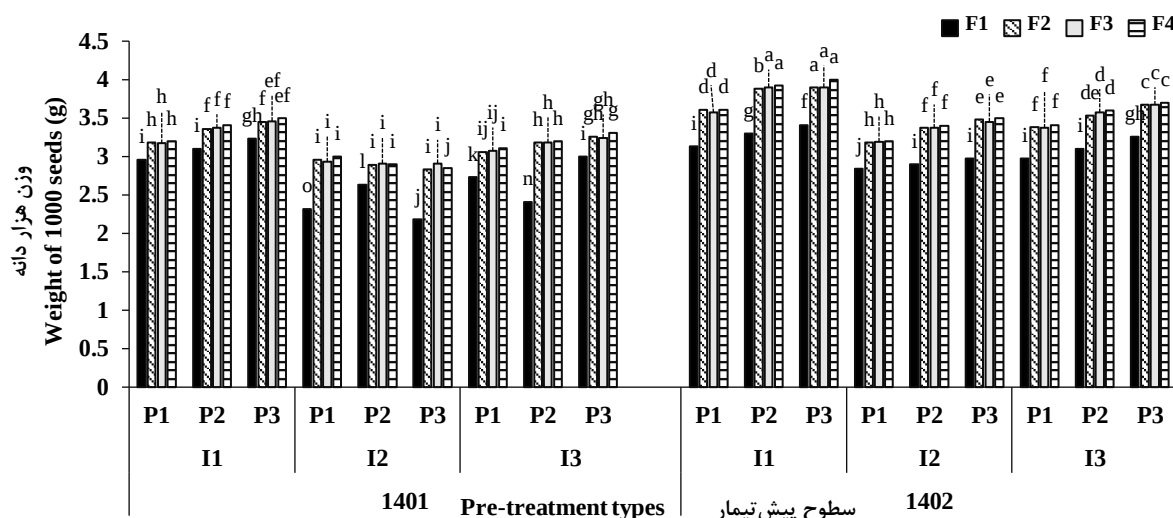
افزایش هر دو ویژگی نسبت به قطع آبیاری بعد از مراحل گلدهی و تشکیل دانه می‌شود. براین اساس، قطع آبیاری در مرحله بعد از گلدهی زیره سبز منجر به کاهش ۲۲/۳ و ۳۷ درصدی عملکرد زیستی و عملکرد دانه در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). پیش تیمار بذر با PEG و آب مقطر بدون تفاوت معنی‌دار، به ترتیب در حدود ۹/۲ و ۴/۷ درصد عملکرد زیستی و در حدود ۲/۴ درصد عملکرد

عملکرد زیستی و عملکرد دانه

مطابق مقایسه میانگین، عملکرد زیستی و عملکرد دانه در سال دوم، به دلیل افزایش بارندگی (جدول ۱)، بیشتر از سال اول بود، به طوری که بوته‌های زیره در سال ۱۴۰۲، به ترتیب ۶/۶ و ۶/۶ درصد عملکرد زیستی و عملکرد دانه بیشتری نسبت به سال ۱۴۰۱، تولید کردند (جدول ۴). نتایج همچنین، نشان داد که استفاده از آبیاری شاهد منجر به

عناصر نسبت به شاهد داشت. به طوری که عملکرد زیستی و عملکرد دانه در کاربرد پوترسین ۱۹/۷ و ۱۰/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت (جدول ۴).

دانه را در مقایسه با عدم پیش تیمار افزایش داد. نتایج مقایسه میانگین محلول پاشی نیز حاکی از افزایش عملکرد زیستی (شکل ۱۶) و عملکرد دانه (شکل ۱۷) در کاربرد برگی تمامی



شکل ۱۵. برهم کنش سال × سطوح آبیاری × پیش تیمار × محلول پاشی بر وزن هزار دانه. I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه، P1، P2 و P3: به ترتیب آبیاری شاهد، پیش تیمار با آب مقطر و PEG، F1، F2، F3 و F4: به ترتیب شاهد، نانو کلات آهن، نانو کلات روی و پوترسین. حروف مشترک در هر گروه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار بین میانگین ها در سطح احتمال پنج درصد است.

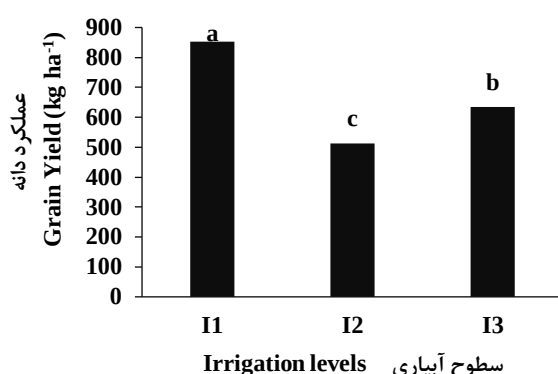
Fig. 15. Interaction of year × irrigation levels × pre-treatment × foliar application on thousand-seed weight. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation; P1, P2, and P3: Representing control irrigation, pre-treatment with distilled water, and PEG; F2, F3, and F4: Representing control, nano iron chelate, nano zinc chelate, and putrescine. 1401= 2022, 1402 = 2023. Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

گیاه و سرعت انباشت ماده خشک شد. گزارش شده است که این موارد می تواند به علت کاهش آب خاک و به دنبال آن کاهش جذب تشعشع تابیده شده، کاهش کارایی فتوسنتز و یا ترکیبی از این دو، صورت می گیرد (Yetik et al., 2023). کاهش عملکرد زیستی در شرایط تنش خشکی نیز به علت کاهش آماس سلولی، کاهش سطح برگ، مقدار فتوسنتز خالص کمتر، کاهش هدایت روزنه ای و مقدار کلروفیل کمتر رخ می دهد. کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش به دلیل کاهش سوخت و ساز کربن، هدایت روزنه ای، کاهش رشد ریشه در اثر کاهش جذب آب، مقدار فتوسنتز و مواد پرورده و در نتیجه، افزایش سرعت پر شدن دانه، کاهش وزن دانه و عملکرد بیان شده است (Yazdani Cham Heidari et al., 2016).

مطابق با نتایج این مطالعه، گزارش شده که پیش تیمار بذرها با آب مقطر منجر به بهبود عملکرد در شرایط تنش خشکی

مطابق با نتایج این پژوهش، نادلی و همکاران (Nadali et al., 2022) گزارش کردند که تنش خشکی عملکرد و اجزای عملکرد کینوا را با کاهش مواجه می کند. کاهش عملکرد و اجزای عملکرد زیره سبز در اثر تنش خشکی توسط یزدانی و همکاران (Yazdani Cham Heidari et al., 2016) گزارش شده است. این پژوهشگران اظهار داشتند که خشکی با محدود ساختن انتقال مواد ذخیره های به دانه و یا با کاهش سهم فتوسنتز برگ ها، به دلیل کاهش کلروفیل، منجر به کاهش اجزای عملکرد از جمله وزن هزار دانه و در نهایت، عملکرد دانه می شود. نتایج این پژوهش نشان داد که هر دو سطح تنش خشکی عملکرد و اجزای عملکرد زیره سبز را با کاهش مواجه می کند، اما حساس ترین مرحله نسبت به تنش مرحله بعد از گلدهی بود. به طوری که عدم دسترسی گیاه به آب منجر به کاهش چشمگیر محتوی نسبی آب، رنگیزه های فتوسنتزی و در نتیجه، کاهش توانایی فتوسنتز

گروه‌بندی ویژگی‌ها متأثر از شرایط آبیاری، پیش تیمار و محلول‌پاشی بودند. بر اساس نتایج، مقادیر کلروفیل، شاخص برداشت و تعداد چتر در بوته در یک گروه، همبستگی مثبت با یکدیگر نشان دادند و به‌شدت متأثر از قطع آبیاری در مرحله بعد از گلدهی (I3)، پیش تیمار با پلی‌اتیلن گلیکول (P2) و P3 به ترتیب) و نانو کلات روی و پلی آمین پوترسین (F3 و F4) قرار داشتند. درحالی‌که سایر ویژگی‌ها در گروه دیگری همبستگی مثبت و بالایی با دیگر مؤلفه دیگر نشان دادند و تحت تأثیر آبیاری شاهد (I1)، پیش تیمار با پلی‌اتیلن گلیکول (P2 و P3 به ترتیب) و نانو کلات روی و پلی آمین پوترسین (F3 و F4) بودند.



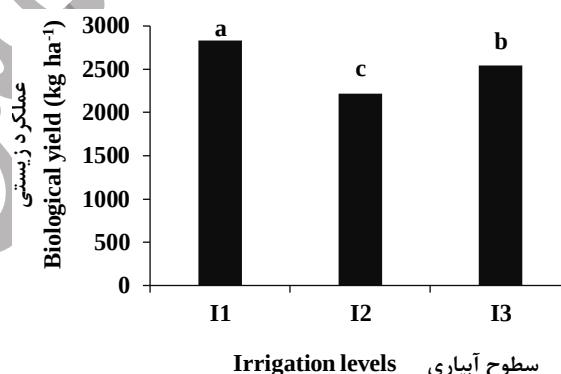
شکل ۱۷. مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر عملکرد دانه. I1، I2 و I3 به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه، حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

Fig. 17. Comparison of the Mean Levels of Irrigation on Grain Yield. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation; Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

نتیجه‌گیری نهایی

بر اساس نتایج این پژوهش، زیره سبز، در دوره رشد خود تحت تأثیر شرایط آب هوایی منطقه جیرفت قرار گرفت. به‌طوری‌که مقدار بارندگی در ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن سال ۱۴۰۱ به ترتیب ۰/۹، ۱/۹، صفر و صفر میلی‌متر بود که در سال ۱۴۰۲ به ترتیب به ۱/۲، ۲۰/۱، ۱۵۲/۸ و صفر میلی‌متر رسید. حساس‌ترین مرحله تنش دوره بعد از گلدهی زیره سبز بود که بیشترین خسارت را بر عملکرد دانه گیاه، ۳۷ درصد کاهش نسبت به شاهد، وارد کرد؛ بنابراین، می‌توان با اعمال کم آبیاری در دوره‌های که دسترسی کوتاه‌مدت گیاه

می‌شود. این نویسندگان اظهار داشتند که هیدروپرایمینگ، دانه را توانمند کرده و غلبه آن بر تنش خشکی را به دنبال دارد (Nadali et al., 2022). افزون بر این، ویژگی‌های مورد مطالعه در این پژوهش، با پیش تیمار بذرها توسط PEG نسبت به آب مقطر از برتری نسبی برخوردار شد، چرا که بذره‌های پیش تیمار شده، جوانه‌زنی و گلدهی زودتر و در نتیجه، عملکرد دانه بیشتری دارند. در پژوهشی، محلول‌پاشی زیره سبز با آهن و روی افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاه را به دنبال داشت. چرا که با کاهش مقدار رطوبت خاک، کاهش تحرک عناصر روی و آهن در خاک به دلیل کاهش رشد ریشه رخ می‌دهد (Yazdani Cham Heidari et al., 2016). به نظر می‌رسد پلی آمین‌ها با ویژگی آنتی‌اکسیدانی، مهار پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و کاهش تولید رادیکال‌های آزاد از آسیب سلولی، تولید اتیلن و پیری و مرگ سلول‌ها بازداري کرده (Abd Elba et al., 2019) و منجر به افزایش دوره مؤثر پر شدن دانه و عملکرد دانه شده است.



شکل ۱۶. مقایسه میانگین سطوح آبیاری بر عملکرد زیستی. I1، I2 و I3 به ترتیب آبیاری شاهد، قطع آبیاری بعد از مرحله گلدهی و تشکیل دانه، حروف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد است.

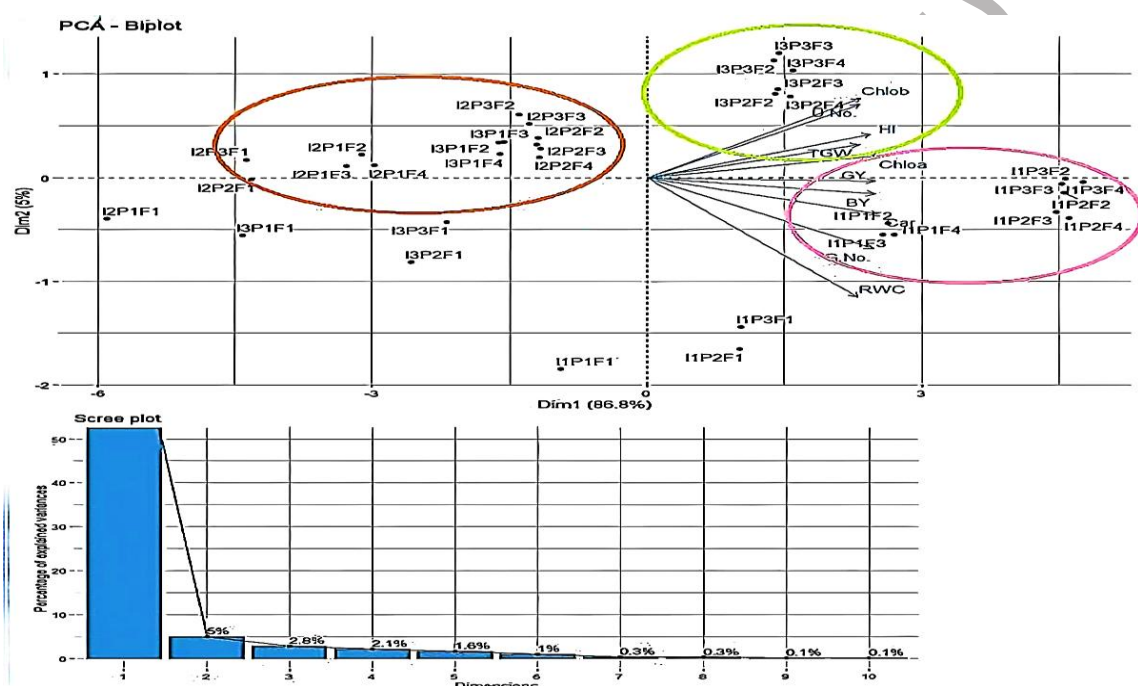
Fig. 16. Comparison of the mean levels of irrigation on biological yield. I1, I2, and I3: Representing control irrigation, irrigation cutoff after the flowering stage, and seed formation; Common letters within each group indicate no significant differences among means at the 5% probability level.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

همان‌گونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، ۸۶/۸ و پنج درصد ویژگی‌های مورد مطالعه، به ترتیب مؤلفه اول و دوم را شامل شدند. همان‌طور که پیش‌ازین نیز ذکر شد، ویژگی‌های بررسی شده تحت تأثیر تیمارهای آزمایش قرار گرفتند که موضوع در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نیز مشهود است و

کم آبیاری به جای قطع آبیاری توصیه می‌شود. همچنین، در صورت قطع آبیاری، بایستی در مراحل حساس گیاه، به‌ویژه دوره گلدهی از قطع آبیاری خودداری کرد. کاربرد روش پیش تیمار، به‌ویژه تیمار با پلی‌اتیلن گلیکول، و محلول‌پاشی عناصر مغذی که در این پژوهش کاربرد تمامی عناصر مغذی توانستند در مقایسه با شاهد بر افزایش رشد و عملکرد زیره سبز مؤثر بودند، همراه با روش‌های کم آبیاری قادر به بهبود رشد و عملکرد زیره سبز است.

به آب جهت بیشترین رشد و عملکرد آن لازم نمی‌باشد، در مصرف آب در منطقه را کاهش داد. در این مطالعه، کاربرد پلی‌اتیلن گلیکول بیشتر از آب مقطر توانست ویژگی‌های فیزیولوژیک، اجزای عملکرد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد. همچنین، محلول‌پاشی گیاه با نانو کلات روی و پلی آمین پوترسین نیز نسبت به محلول‌پاشی آهن، نتایج مطلوب‌تری را به خود اختصاص داد. در مجموع، جهت دستیابی به بیشترین رشد و عملکرد زیره سبز در منطقه جیرفت، اعمال روش‌های



شکل ۱۸. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مرتبط با ویژگی‌های مورد مطالعه مربوط به زیره سبز. I1: آبیاری شاهد، I2: قطع آبیاری در مرحله بعد از گلدهی، I3: قطع آبیاری در مرحله بعد از پر شدن دانه. سه سطح پیش تیمار بذر P1: شاهد، P2: پیش تیمار با پلی‌اتیلن گلیکول، P3: پیش تیمار با آب مقطر. چهار سطح محلول‌پاشی عناصر مغذی شامل F1: شاهد، F2: نانو کلات آهن، F3: نانو کلات روی و F4: پوترسین. عملکرد دانه: (GY)، عملکرد زیستی: (BY)، وزن هزار دانه: (TGW)، تعداد چتر در بوته: (No. U)، تعداد دانه در چتر: (No. G)، کلروفیل (Chlo. a)، کلروفیل b (Chlo. b)، کاروتنوئید: (Car)، محتوی نسبی آب (RWC).

Fig. 18. Principal Component Analysis Related to Studied Traits of Cumin. I1: Control irrigation; I2: Irrigation cutoff after flowering stage; I3: Irrigation cutoff after seed filling stage. P1: Control; P2: Pre-treatment with polyethylene glycol (PEG); P3: Pre-treatment with distilled water. F1: Control; F2: Nano iron chelate; F3: Nano zinc chelate; F4: Putrescine. Grain yield (GY), biological yield (BY), thousand-seed weight (TGW), number of umbels per plant (No. U), number of seeds per umbel (No. G), chlorophyll a (Chlo. a), chlorophyll b (Chlo. b), carotenoid (Car), and relative water content (RWC).

منابع

Abbasi-Nejad, A., Majnoun Hosseini, N., Tavakol Afshari, R., Sharifzadeh, F., 2009. Evaluation of the possibility of changing planting date using seed priming method on

grain yield and its components in chickpea cultivars. Iranian Journal of Field Crop Science. 40, 7-13. [In Persian with English Summary].

- Abd Elbar, O.H., Farag, R.E., Shehata, S.A., 2019. Effect of putrescine application on some growth, biochemical and anatomical characteristics of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *Annals of Agricultural Sciences*. 64, 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.09.001>
- Alipour, A., Zahedi, H., 2018. Effect of foliar application of nano chelated iron and manganese on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and yield components under drought stress conditions. *Applied Agricultural Research (Research and Development)*. 31(1), 39-51. [In Persian with English Summary]. <https://sid.ir/paper/214770/fa>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Arabpour, R., Yadavi, A.R., Blouchi, H.R., Allahdadi, I., 2023. Effect of foliar application of iron and zinc on improving nutrient uptake, grain yield and water use efficiency in sunflower under drought stress conditions. *Journal of Crop Science*. 25, 977-993. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2023.352118.2767>
- Arasteh, F., Moghaddam, M., Ghasemi Pirbalouti, A., 2020. Effect of putrescine foliar application on inducing resistance to drought in Mexican marigold (*Tagetes minuta* L.). *Cell and Tissue*. 11, 204-220. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/ct.2020.291540.1264>
- Ashouri, A., Gholipour, M., Gholami, A., Abbasdokht, H., 2024. Evaluation of morphological and physiological characteristics of cumin using magnetic water and super absorbent under deficit irrigation regimes. *Journal of Crop Science*. 26, 145-159. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.342656.2704>
- Asl Mohammadi, Z., Mohammadkhani, N., Servati, M., 2021. Effect of iron and zinc foliar application on some biochemical traits of thyme (*Thymus vulgaris* L.) under nitrogen deficiency. *Plant Research*. 34, 576-592. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jpr.2021.316453.1390>
- Ebrahimi, Z., Biabani, A., Mohammadi, R., Sabouri, H., Rahemi Karizaki, A., 2022. Response of physiological and biochemical characteristics of Aseman wheat cultivar to foliar application of zinc and iron under rainfed conditions. *Journal of Crop Breeding*. 14, 53-62. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.61186/jcb.14.41.53>
- Gholami, S., Amini Dehaghi, M., Rezazadeh, A., 2021. Effect of different selenium concentrations on germination characteristics and proline content of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 14, 1029-1040. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3458.1863>
- Karimi Afshar, A., Baghizadeh, A., Mohammadi Nejad, G., 2015. Physiological evaluation of drought tolerance in two cumin ecotypes under greenhouse conditions. *Journal of Greenhouse Culture Science and Technology*. 6, 175-184. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22069/jopp.2015.2362>
- Khalequzzaman, Ullah, H., Himanshu, S.K., Islam, N.E.T., Tisarum, R., Cha-um, S., Datta, A., 2023. Seed priming improves germination, yield and water productivity of cotton under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 3, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01196-5>
- Khayat Moghaddam, M.S., Gholami, A., Shirani Rad, A.H., Baradaran Firouzabadi, M., Abbasdokht, H., 2021. Effect of potassium silicate and end-season drought stress on canola characteristics. *Journal of Crop Science*. 23, 761-776. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2021.306872.2424>
- Lichtenthaler, H.K., Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 11, 591-592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Malekzadeh, S., Fallah, S., 2016. Effects of seed priming treatments on emergence of Ajowan under different irrigation levels. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 9, 173-184. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.363>
- Mohammadi-Cheraghabadi, M., Mousavi, A., Hazrati, S., Modarres-Sanavy, S.A.M., Sefidkon, F., Mokhtassi-Bidgoli, A., 2024. Study of timing of irrigation after foliar application of putrescine on phytochemical and

- physiological responses of sage. *Crop Science*. 64, 887-902. <https://doi.org/10.1002/csc2.21202>
- Mohseni Mohammadjanloo, A.R., Seyedsharifi, R., Khomari, S., 2021. Effect of irrigation cut-off at reproductive stages and application of putrescine and biofertilizers on grain filling period, chlorophyll content and wheat yield. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 19, 153-167. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2021.67402.1000>
- Nadali, F., Asghari, H.R., Abbasdokht, H., Dorostkar, V., Bagheri, M., 2022. Physiological and agronomic responses of different cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) to hydropriming under drought stress conditions. *Arid Crops Science Research*. 4, 245-262. [In Persian with English Summary].
- Porra, R.J., 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis Research*. 73, 149-156.
- Qavidel, Sh., Mostafavi, Kh., Pourabouqadare, A., 2023. Investigation of terminal season drought stress effects on grain yield and some agronomic and physiological traits in promising barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes. *Journal of Crop Breeding*. 15(46), 93-103. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.61186/jcb.15.46.93>
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., Gao, H., 2024. Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*. 13, 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants13131808>
- Rivandi, H., Rezvan, S., Jami Moeini, M., Sinaki, J.M., Damavandi, A., Sanjani, S., 2020. Evaluation of quantitative and qualitative yield of cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes in response to planting dates in Sabzevar climatic conditions. *Journal of Agroecology*. 12, 240-277. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/agry.v12i1.73940>
- Sánchez, F.J., Manzanares, M., De Andres, E.F., Tenorio, J.L., Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Research*. 59, 225-235.
- Sattar, A., Wang, X., Ul-Allah, S., Sher, A., Ijaz, M., Irfan, M., Abbas, T., Hussain, S., Nawaz, F., Al-Hashimi, A., Al Munqedhi, B.M., Skalicky, M., 2022. Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. *Saudi Journal of Biological Science*. 29, 1699-1706. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.061>
- Tavassoli, A., 2021. The effect of seed priming on yield and some quality indices of medicinal plant roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) under drought stress conditions. *Journal of Desert Management*. 9, 81-96. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2021.244526>
- Wei, D., Tian, B., Wu, Q., Wang, H., Wang, P., Meng, Q., 2024. Water stress combining weather condition shapes wheat yield and inter-annual yield variability: field observations from a six-year study. *European Journal of Agronomy*. 159, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127291>
- Yazdani Cham Heidari, Y., Ramroudi, M., Asgharipour, M.R., 2016. Study of drought stress on yield and yield components of cumin (*Cuminum cyminum* L.) affected by iron and zinc foliar application. *Applied Research in Plant Ecophysiology*. 1, 81-96. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2016.363>
- Yetik, A.K., Nazmi Candoğan, B., 2023. Chlorophyll response to water stress and the potential of using crop water stress index in sugar beet farming. *Sugar Tech*. 25, 57-68. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01184-6>