Plant Production Technology/ Volume 24/ Issu 2/ Pages 21-33/ Autumn and Winter 2025
https://doi.org/10.22084/ppt.2024.29909.2136

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Improvement of Water Productivity in the Condition of Irrigation Interruption in the Flowering Stage of Sesame in Response to the Application of Humic Acid and Silicon

Kazemi[1*], K. and Eskandari[2], H.

1 and 2. Assistant Professor and Associate Professor, Respectively, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran
*: Corresponding Author Email: Kamyar.kazemi@pnu.ac.ir

Received: 2024/09/19 Accepted: 2024/10/19

Introduction
The production of oilseeds is very important in the economy of every country, because the consumption of oil in the world has an upward trend, so that it is predicted that by 2030, the global need for edible oil will reach one billion kilograms. Sesame, as an annual oilseed plant, is widely cultivated in arid and semi-arid regions of the world. Although sesame is more drought tolerant than other oilseeds, its production is affected by high levels of drought stress .In general, the results of various researches show that sesame reacts to water stress and its sensitivity to drought stress should be evaluated accurately. Since the effects of deficit irrigation during the sesame flowering stage have not been well investigated, in the present study, an attempt has been made to investigate the effect of drought stress on sesame production, and the possible effects of humic acid and silicon foliar application in reducing the negative effects of drought stress.

Materials and Methods
The experiment was conducted as split factorial based on RCBD with three replications. The experiment factors were irrigation (I_1: full irrigation and I_2: irrigation interrupting at flowering stage) in main plot and humic acid and silicon as sub plot. Three levels of humic acid (0.0, 3.0 and 6.0 kg ha^{-1}) and silicon (0.0, 1.0 and 2.0 mM) were employed. At maturity, grain yield and related traits including, capsule number per plant, grain number per capsule, 1000-grain weight, plant height, biological yield, harvest index, oil yield and protein yield were measured. To measure oil yield, seed oil percentage was first measured (using Soxhlet apparatus) and then the indices of seed oil percentage and seed yield were used. Seed protein percentage was also measured using Kjeldahl apparatus.

Results and Discussion
Under irrigation interrupting at flowering stage, water consumption decreased by 36% and seed protein increased by 10%. Water deficit stress decreased the number of capsules per plant, number of seeds per capsule, plant height, 1000-grain weight and grain oil by 12.5, 32, 26, 9 and 7%, respectively. The highest number of capsules per plant, number of seeds per capsule, plant height, biological yield, oil percentage and seed protein percentage were recorded in the foliar application of 6 kg $^{-1}$ of humic acid, which were 20%, 52%, 64%, 18%, 4% and 11% more than that of no humic acid application treatment, respectively. Similar results were recorded for the consumption of 2 mM silicon where silicon foliar application led to the improvement of indicators related to the yield and quality of sesame seeds. The highest number of capsules per plant, number of seeds per capsule, plant height, harvest index, oil percentage and seed protein percentage were obtained with the consumption of 2 mM silicon, which is 21, 26, 38, 6, 4 and 13% more than the treatment which did not use silicone. The use of 6 kg $^{-1}$ of humic acid and 2 mM silicon increased the yield of oil and protein by 60 and 82%, respectively. The highest water productivity of sesame water (0.756 kg m^{-3}) was obtained in the treatment of interruption of irrigation and consumption of 6 kg $^{-1}$ of humic acid and 2 mM silicon. Finally, it can be stated that the consumption of two 6 kg $^{-1}$ of humic acid and 2 mM silicon can reduce the effects of water shortage stress on sesame.

Conclusion
In this study, applying limited irrigation reduced the production of sesame seeds and oil (by 25 and 30%, respectively). However, since in the drought stress treatment, water consumption was lower than in full irrigation, the water productivity for seed production increased by 58% in the treatment of interruption of irrigation. Humic acid and silicon increased the tolerance of sesame to drought and improved seed yield and related traits. According to the fact that in the present study, the interruption of irrigation was necessarily applied in the flowering stage based on the conditions of the region, it is necessary to investigate the effects of interruption of irrigation in the vegetative growth stages in order to support the idea that probably the interruption of irrigation in the vegetative growth stage increases water productivity in sesame without serious impact on seed yield, gave a more accurate answer.

Keywords: Deficit irrigation, grain quality, oil, protein, yield

Citations: Kazemi, K. and Eskandari, H. (2025). Improvement of Water Productivity in the Condition of Irrigation Interruption in the Flowering Stage of Sesame in Response to the Application of Humic Acid and Silicon. *Plant Production Technology*, 24(2), 21-33. https://doi.org/10.22084/ppt.2024.29909.2136

© 2022 The Author(s). Bu- Ali Sina University Publication. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Online ISSN: 2476-5651 **Print ISSN:** 2476-6321

فنآوری تولیدات گیاهی/ جلد بیست و چهارم/ شمارهٔ دوم/ صفحات ۲۱-۳۳/ پاییز و زمستان ۱۴۰۳
https://doi.org/10.22084/ppt.2024.29909.2136

بهبود بهره‌وری آب در شرایط قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی کنجد در پاسخ به کاربرد اسید هیومیک و سیلیکون

Improvement of Water Productivity in the Condition of Irrigation Interruption in the Flowering Stage of Sesame in Response to the Application of Humic Acid and Silicon

کامیار کاظمی[1*] و حمداله اسکندری[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸
(مقاله پژوهشی)

چکیده

برای ارزیابی اثر اسید هیومیک و سیلیکون در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی بر عملکرد و کیفیت دانه‌ی کنجد، آزمایشی به‌صورت اسپلیت- فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور شهرستان شادگان، استان خوزستان در سال زراعی ۴۰۲-۱۴۰۱ اجرا گردید. عامل‌های آزمایش شامل آبیاری (آبیاری معمول و قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی) در کرت اصلی و محلول‌پاشی اسید هیومیک (بدون محلول‌پاشی، سه و شش کیلوگرم در هکتار) و سیلیکون (بدون محلول-پاشی، یک میلی‌مولار و دو میلی‌مولار) به‌صورت فاکتوریل (سه در سه) در کرت فرعی قرارگرفتند. با قطع آبیاری، مصرف آب حدود ۳۶ درصد کاهش و پروتئین دانه به میزان ۱۰ درصد افزایش یافت. تنش کمبود آب تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و درصد روغن دانه را به‌ترتیب ۱۲/۵، ۳۲، ۲۶، ۹ و ۷ درصد کاهش داد. بیشترین تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی، درصد روغن و درصد پروتئین دانه در تیمار محلول‌پاشی شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک ثبت شد که به‌ترتیب ۲۰، ۵۲، ٦٤، ۱۸، ٤ و ۱۱ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک بود. نتایج مشابهی در مورد مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون ثبت‌شد. مصرف شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و به همراه دو میلی‌مولار سیلیکون باعث افزایش عملکرد روغن و پروتئین به میزان ٦۰ و ۸۲ درصد شد. بیشترین بهره‌وری آب کنجد (۰/۷۵٦ کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمار قطع آبیاری و مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون و شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به‌دست‌آمد. در نهایت می‌توان اعلام‌کرد که مصرف سیلیکون و اسید هیومیک می‌تواند اثرات تنش کمبود آب بر کنجد در مرحله گلدهی را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: کم‌آبیاری، کیفیت دانه، روغن، پروتئین، عملکرد

ارجاع به مقاله: کاظمی، ک.، اسکندری، ح. (۱۴۰۳). بهبود بهره‌وری آب در شرایط قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی کنجد در پاسخ به کاربرد اسید هیومیک و سیلیکون، *مجله فنآوری تولیدات گیاهی*، ۲۴(۲)، ۲۱-۳۳. https://doi.org/10.22084/ppt.2024.29909.2136

حق نشر متعلق به نویسنده (گان) است و نویسنده تحت مجوز Commons Creative License Attribution (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) به مجله اجازه می‌دهد مقاله‌ی چاپ شده را در سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱ **شاپا چاپی:** ۲۴۷۶-۶۳۲۱

۱ و ۲. به‌ترتیب استادیار و دانشیار، گروه علمی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*: نویسنده مسئول Email: Kamyar.kazemi@pnu.ac.ir

۱. مقدمه

تولید دانه‌های روغنی در اقتصاد هر کشور دارای اهمیت زیادی است چرا که مصرف روغن در جهان روندی صعودی دارد. پیش‌بینی شده‌است که تا سال ۲۰۳۰ نیاز جهانی به روغن خوراکی تا یک میلیارد کیلوگرم برسد (Dossa *et al.*, 2017). در این بین، کنجد (*Sesamum indicum* L.) به‌عنوان یک گیاه دانه روغنی یکساله که به‌طور گسترده‌ای در مناطق خشک و نیمه خشک جهان کشت می‌شود (Baghery *et al.*, 2022)، پتانسیل افزودن بر تولید روغن کشور را داراست. کنجد یکی از قدیمی‌ترین گیاهان دانه روغنی است که با ۵۷-۴۴ درصد روغن، ۲۵-۱۸ درصد پروتئین و ۱۴-۱۳ درصد فیبر ، ارزش غذایی بالایی دارد (Yemata and Bekele, 2024).

اگرچه کنجد نسبت‌به سایر دانه‌های روغنی تحمل بیشتری به خشکی دارد، ولی تولید کنجد از سطوح بالای تنش خشکی متاثر می‌شود (Kouighat *et al.*, 2024). بررسی تأمین ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه نشان داد که تنش خشکی بیش از ۵۰ درصد از عملکرد دانه‌ی کنجد را کاهش‌می‌دهد (Asadi *et al.*, 2021). مطالعه برنامه آبیاری کنجد با استفاده از تشتک تبخیر (۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر)، نشان‌داد که کمبود آب باعث کاهش حدود ۲۹ درصدی عملکرد دانه و روغن شد (Dahie Zehi *et al.*, 2021). ارزیابی اثرات تنش کمبود آب بر کنجد با افزایش فاصله آبیاری (آبیاری پس از هفت، ۱۲ و ۱۷ روز) آشکار نمود که با افزایش فاصله آبیاری تا ۱۷ روز، عملکرد دانه، وزن دانه و تعداد دانه کنجد به‌ترتیب ۱۲، ۲۷ و ۱۲ درصد کاهش پیدا کردند (Heidari *et al.*, 2016). نتایج حاصل از تحقیقات مختلف نشان‌می‌دهد که میزان حساسیت کنجد به روش اعمال تنش خشکی باید به‌طور دقیق موردارزیابی قرار گیرد.

یکی از نهاده‌ها برای بهبود عملکرد کمّی و کیفی گیاهان زراعی اسیدهای آلی است و اسید هیومیک یکی از آن‌ها به‌شمار می‌رود. اسید هیومیک به‌دلیل اثرات شبه‌هورمونی اثرات مفیدی در افزایش تولید گیاهان زراعی دارد (Heidari *et al.*, 2020) و به‌عنوان یک نهاده بوم‌سازگار شناخته‌می‌شود. اثر مثبت اسید هیومیک بر رشد اندام‌های مختلف گیاه، به‌ویژه ریشه، باعث شده‌است که کاربرد این ماده به افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی در گیاهان زراعی منجر شود (Jahan *et al.*, 2020). گزارش شده‌است که کاربرد شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک می‌تواند اثرات تنش کمبود آب (تامین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) در ذرت را کاهش دهد و به افزایش عملکرد و اجزای عملکرد دانه منجر شود (Jahan and Amiri, 2018). در صورت بروز تنش خشکی در طول دوره‌ی رشد گیاه دانه روغنی گلرنگ، استفاده از اسید هیومیک می‌تواند رشد رویشی و زایشی گیاه را بهبود ببخشد و عملکرد دانه را تا حدود نُه درصد افزایش دهد (Karimi and Tadayyon, 2018). محلول‌پاشی اسید هیومیک در گندم، اگرچه عملکرد دانه را در شرایط غیرتنش حدود هفت درصد افزایش داد، ولی در شرایط تنش خشکی (افزایش دور آبیاری بر اساس تشتک تبخیر) اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه نداشت (Pazoki, 2016). به‌نظرمی‌رسد، اثر متقابل آبیاری و محلول‌پاشی اسید هیومیک در گیاهان مختلف متفاوت باشد؛ لذا واکنش هر گیاه باید به‌طور اختصاصی بررسی شود.

اگرچه سیلیکون به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری برای گیاهان زراعی مطرح نیست، ولی از آن‌جا که باعث افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (Chen *et al.*, 2024)، می‌تواند در زمان وقوع تنش‌های غیرزیستی، تحمل گیاهان زراعی را افزایش‌دهد. جلوگیری از اثرات مخرب تنش کم‌آبی و بهبود بهره‌وری از اثرات مثبت سیلیکون بر گیاهان زراعی معرفی شده‌است (Tripathi *et al.*, 2016). استفاده از سیلیکون به‌صورت محلول‌پاشی در شرایط تنش شدید کم‌آبی (قطع آبیاری در مرحله ۵۰ درصد مرحله غلاف‌بندی)، باعث بهبود چهار درصدث عملکرد دانه گندم (Aghaie *et al.*, 2023) و استفاده از دو میلی‌مولار سیلیکون در شرایط تنش خشکی (کاهش ظرفیت مزرعه) در گلرنگ (Amiri *et al.*, 2013) باعث افزایش وزن هزاردانه، ارتفاع بوته و عملکرد دانه شده‌است.

در منطقه شادگان، کنجد یک گیاه تابستانه است که به‌صورت کشت دوم زراعت می‌شود. در کشت تابستانه محصولات اصلی برنج یا کنجد می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، کشاورزانی که به‌دلایل مختلف (از جمله محدودیت دسترسی به آب آبیاری) قادر به کشت برنج نمی‌باشند، به زراعت کنجد اقدام‌می‌کنند. بااین‌حال، محصولات زراعی دیگری نیز از جمله ذرت، ماش، لوبیا و هندوانه همزمان با کنجد کشت می-

شوند. به‌همین دلیل، ممکن است در مراحل مختلف رشد کنجد (از جمله گلدهی) نوبت آبیاری الزاماً به گیاه دیگر اختصاص پیدا کند. در این‌صورت کنجد با کم‌آبیاری مواجه‌می‌شود. از آن‌جاکه تاکنون اثرات قطع آبیاری در مرحله گلدهی بر تولید و کیفیت دانه‌ی کنجد به خوبی بررسی نشده‌است، در پژوهش حاضر کوشش شد تا ضمن بررسی اثرت تنش خشکی بر تولید کنجد، اثرات احتمالی محلول‌پاشی اسید هیومیک و سیلیکون در کاهش اثرات منفی تنش خشکی مورد بررسی قرار گیرد.

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور شادگان، استان خوزستان (عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰ متر از سطح دریا) اجرا گردید. اقلیم منطقه از نوع گرم‌وخشک بوده و متوسط دما و بارندگی سالیانه آن به‌ترتیب ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل و برخی خصوصیات اقلیمی منطقه محل اجرای آزمایش در طول دوره رشد گیاه به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ درج شده‌است.

Table 1: Some physical and chemical properties of the soil of the experimental site

Depth (cm)	Texture	EC ($ds\ m^{-1}$)	pH	K_2O ($mg\ kg^{-1}$)	P_2O_5 ($mg\ kg^{-1}$)	N (%)	Organic Carbon (%)
0-60	Silt-loam	1.88	7.3	224	14.0	0.08	0.51

Table 2: Some climatic properties of the experimental site during 2022-23 growing season

Month	Monthly minimum temperature (°C)	Monthly maximum temperature (°C)	Relative humidity (%)	Precipitation (mm)
June	33.2	43.8	61.0	-
July	28.5	42.5	75.0	-
August	27.5	38.6	64.0	-
September	27.0	35.3	48.0	-
October	23.0	30.2	23.0	0.1

۲. مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت اسپلیت-فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل آبیاری در دو سطح (I_1: آبیاری معمول و I_2: قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی) در کرت اصلی و اسید هیومیک و سیلیکون به‌صورت فاکتوریل (سه‌درسه) در کرت فرعی قرارگرفتند. اسید هیومیک (تولید شده توسط شرکت اکسیر دانش آبادیس) در سه سطح شامل بدون محلول‌پاشی و غلظت‌های سه و شش کیلوگرم در هکتار و سیلیکون (به‌صورت مونوسیلیک اسید H_4SiO_4 ساخت شرکت فرمولایف) در سه سطح شامل بدون محلول‌پاشی و غلظت‌های یک و دو میلی‌مولار به‌صورت محلول‌پاشی در دو مرحله (مرحله ۸-۶ برگی و قبل از گلدهی) به‌کار رفتند. یک کرت زمانی به گل رفته در نظر گرفته‌شد که حداقل ۵۰ درصد از بوته‌های کرت به گل رفته‌باشد (Kalantari *et al.*, 2021). جهت اطمینان از عدم تبخیر محلول‌های غذایی توسط آفتاب، محلول‌پاشی پس از غروب آفتاب با استفاده از سمپاش پشتی جکتو با نازل پاشنده یک ردیفه انجام گرفت.

برای تهیه زمین، ابتدا محل اجرای آزمایش با گاوآهن بشقابی شخم زده‌شد. در مرحله بعد، کود اوره (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله‌ی پایه و سرک در مرحله چهار برگی)، سوپرفسفات تریپل (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات پتاسیم (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) (Kazemi *et al.*, 2023) اضافه و با خاک مخلوط شدند. در ادامه جوی و پشته‌ها با استفاده از شیارکش (فاروئر) تهیه‌شدند. هر کرت شامل شش ردیف کاشت (فاصله بین ردیف ۵۰ و فاصله روی ردیف پنج سانتی-متر) به‌طول چهار متر بود. برای اطمینان از سبز شدن بذرها، کشت با تراکم بالا در ۱۰ تیرماه انجام‌گرفت. سپس، در مرحله استقرار گیاهچه‌ها (مرحله چهاربرگی) کرت‌ها تا تراکم مطلوب (۴۰ بوته در متر مربع) تنک شدند. در طول دوره رشد، علف-های هرز به‌صورت دستی کنترل‌شدند. در هر مرحله از آبیاری، حجم آب آبیاری با استفاده از کنتور محاسبه و برای محاسبه

بهره‌وری آب از رابطه (۱) استفاده شد (Eskandari and Alizadeh Amraie, 2018):

$$WP = [Y/I] \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، WP بهره‌وری آب، Y عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار و I حجم آب آبیاری می‌باشد. در مرحله رسیدگی، بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای، بوته‌های هر کرت برداشت و عملکرد دانه و صفات مرتبط با آن شامل تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، وزن هزار دانه، ارتفاع بوته، عملکرد زیستی و شاخص برداشت اندازه‌گیری‌شدند. برای اندازه‌گیری عملکرد روغن، ابتدا درصد روغن دانه (استفاده از حلال و دستگاه سوکسله) اندازه‌گیری‌شد و سپس شاخص‌های درصد روغن دانه و عملکرد دانه محاسبه‌شد. برای اندازه‌گیری درصد پروتئین دانه، ابتدا میزان نیتروژن دانه با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه‌گیری‌شد. سپس، میزان نیتروژن دانه در عدد ۵/۷ ضرب گردید (Zhao *et al.*, 2008). برای تجزیه داده‌ها، نرم‌افزارهای Excel و MSTATC به‌کار رفت. میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی مقایسه شدند.

۳. نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر اصلی آبیاری، اسید هیومیک (به‌جز در مورد وزن هزار دانه و مصرف آب) و سیلیکون (به‌جز در مورد وزن هزار دانه و مصرف آب) بر تمامی صفات مورد بررسی معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود. برهمکنش آبیاری در اسید هیومیک تنها بر صفات عملکرد دانه، شاخص برداشت، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین تاثیر معنی‌داری ($P\leq0.01$) داشت. صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین به‌طور معنی‌داری ($P\leq0.01$) تحت تاثیر برهمکنش آبیاری در سیلیکون قرارگرفتند ولی سایر صفات به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر این اثر متقابل قرار نگرفتند (جدول ۳). برهم‌کنش اسیدهیومیک در سیلیکون بر صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود ولی سایر صفات را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار نداد (جدول ۳). برهم‌کنش سه گانه آبیاری در اسید هیومیک در سیلیکون تنها بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب اثر معنی‌داری ($P\leq0.01$) داشت (**جدول ۳**).

با قطع آبیاری در مرحله گلدهی (تیمار I2) مصرف آب حدود ۳۶ درصد کاهش یافت و میزان پروتئین دانه به‌میزان ۱۰ درصد نسبت‌به مقدار اولیه بیشتر شد (جدول ٤). بااین‌حال، تنش کمبود آب در مرحله گلدهی تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، وزن هزار دانه و درصد روغن دانه را به ترتیب ۱۲/۵، ۳۲، ۲۶، ۹ و ۷ درصد کاهش داد (جدول ٤).

مصرف اسید هیومیک، شاخص‌های مرتبط با عملکرد و کیفیت دانه را بهبود بخشید (جدول ۵). بیشترین مقدار این صفات با مصرف بالاترین میزان اسید هیومیک به‌دست‌آمد، به‌طوری‌که تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، عملکرد بیولوژیک، درصد روغن و درصد پروتئین دانه در تیمار محلول‌پاشی شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک ثبت شد که به ترتیب ۲۰، ۵۲، ٦٤، ۱۸، ٤ و ۱۱ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک (شاهد) بود (جدول ۵).

محلول‌پاشی سیلیکون به بهبود شاخص‌های مرتبط با عملکرد و کیفیت دانه کنجد منجرشد (جدول ٦). بیشترین تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، ارتفاع بوته، شاخص برداشت، درصد روغن و درصد پروتئین دانه با مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون به‌دست‌آمد که به‌ترتیب ۲۱، ۲۶، ۳۸، ٦، ٤ و ۱۳ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف سیلیکون بود (جدول ٦).

در شرایط آبیاری معمول (غیرتنش) مصرف اسید هیومیک شاخص برداشت را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار نداد ولی با قرار گرفتن کنجد در شرایط قطع آبیاری، میزان شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری بهبود پیدا کرد به‌طوری‌که، با محلول‌پاشی شش کیلوگرم در هکتار اسیدهیومیک، شاخص برداشت نسبت‌به تیمار شاهد (در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی) حدود ۱۰ درصد افزایش یافت (شکل ۱). به‌بیان‌دیگر، مصرف اسید هیومیک توانست اثرات منفی کمبود آب در مرحله گلدهی را بر شاخص برداشت کنجد تعدیل کند (شکل ۱).

Table 3: Analysis of variance of measured traits of sesame in response to irrigation, humic acid and silicon

Source of Variance	df	CP	PC	PH	GW	GY	BY	HI	GOP	OY	WC	WP	GPP	PY
Replication	2	20.1^{ns}	74.1^{ns}	164^{ns}	0.056^{ns}	2192^{ns}	66655^{ns}	0.889^{ns}	1.26^{ns}	1266^{ns}	2087^{ns}	0.0001^{ns}	5.72^{ns}	256^{ns}
Irrigation (I)	1	523^{*}	6936^{**}	6534^{*}	1.86^{*}	166537^{**}	11614851^{**}	40.9^{*}	156^{**}	624037^{**}	55170272^{**}	0.602^{**}	104^{*}	22940^{**}
Error	2	6.5	60.2	112	0.050	1087	47251	1.185	0.075	238	1468	0.0001	2.06	66.7
Humic acid (H)	2	3.6^{**}	2666^{**}	60.7^{**}	0.126^{ns}	324337^{**}	1814034^{**}	18.4^{**}	19.7^{*}	110947^{**}	888^{ns}	0.060^{**}	22.4^{**}	34531^{**}
I × H	2	1.17^{ns}	74.0^{ns}	4.5^{ns}	0.001^{ns}	14962^{**}	9410^{ns}	6.13^{*}	0.312^{ns}	2593^{*}	62.2^{ns}	0.016^{**}	0.772^{ns}	952^{**}
Silicon (S)	2	330^{**}	862^{**}	2500^{**}	0.249^{ns}	306238^{**}	1921202^{**}	16.2^{**}	18.25^{**}	106050^{**}	1016^{ns}	0.064^{**}	29.56^{**}	37041^{**}
I × S	2	11.2^{ns}	45.5^{ns}	48.5^{ns}	0.083^{ns}	35863^{**}	315874^{**}	2.02^{ns}	1.06^{ns}	4452^{**}	63.2^{ns}	0.025^{**}	1.56^{ns}	2657^{**}
H × S	4	6.67^{ns}	52.0^{ns}	123^{ns}	0.049^{ns}	20375^{**}	116602^{ns}	2.22^{ns}	1.51^{ns}	7123^{**}	1619^{ns}	0.004^{**}	2.36^{ns}	2859^{**}
I × H × S	4	2.67^{ns}	16.0^{ns}	18.5^{ns}	0.036^{ns}	7363^{**}	46138^{ns}	2.07^{ns}	0.414^{ns}	1325^{ns}	646^{ns}	0.002^{**}	0.194^{ns}	305^{ns}
Error	32	11.5	22.7	124.5	0.039	1388	51724	1.85	0.547	671	2015	0.0001	1.76	177
CV (%)		7.56	8.04	15.06	6.12	3.02	5.89	4.33	1.50	4.22	1.57	2.35	6.05	4.92

CP: capsule number per plant; GP: Grain number per capsule; PH: Plant height; GW: 1000-grain weight; GY: Grain yield; BY: Biological yield; HI: Harvest index; GOP: Grain oil percentage; OY: Oil yield; WC: Water consumption; WP: Water productivity; GPP: Grain protein percentage; PY: Protein yield

*,** and ns indicate significant at $P\leq0.05$, $P\leq0.01$ and not significant, respectively

Table 4: Mean comparison for the effect of water deficit at flowering stage on some traits of sesame

Irrigation	Capsule number per plant	Grain number per capsule	Plant height (cm)	1000-grain weight (g)	Grain oil (%)	Water consumption (m^3 ha^{-1})	Grain protein (%)
I_1	48a	71a	85a	3.42a	51.1a	2863a	21.0b
I_2	42b	48b	63b	3.10b	47.7b	1842b	23.0a

Different letters in each column indicate significant difference according to Tukey's test. I_1: Normal irrigation, I_2: Water interruption at flowering stage

Table 5: Mean comparison for the effect of humic acid foliar application on some traits of sesame.

Humic acid (Kg ha^{-1})	Capsule number per plant	Grain number per capsule	Plant height (cm)	Biological yield (kg ha^{-1})	Grain oil (%)	Grain protein (%)
0.0	40.2b	47.3c	56.5c	3525c	48.5c	20.8b
3.0	46.3a	59.0b	72.8b	3899b	49.3b	22.1ab
6.0	48.2a	71.7a	93.0a	4156a	50.6a	23.0a

Different letters in each column indicate significant difference according to Tukey's test.

Table 6: Mean comparison for the effect of silicon foliar application on some traits of sesame

Silicon (mM)	Capsule number per plant	Grain number per capsule	Plant height (cm)	Harvest index (%)	Grain oil (%)	Grain protein (%)
0.0	40.3b	52.5c	61.8c	30.3b	48.3b	20.6b
1.0	45.5a	59.2b	75.2b	31.7ab	49.7a	22.1a
2.0	48.8a	66.3a	85.3	32.2a	50.3a	23.2a

Different letters in each column indicate significant difference according to Tukey's test

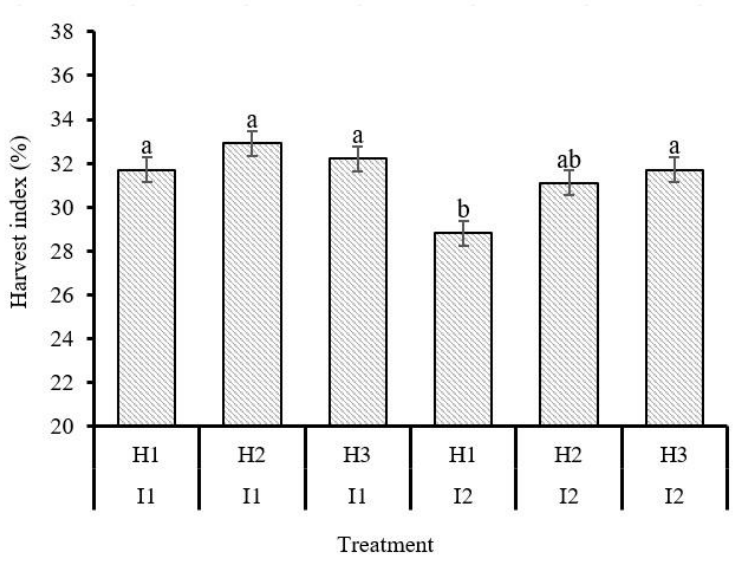

Fig. 1: Harvest index (%) of sesame in different irrigation and humic acid treatments
I_1: Full irrigation; I_2: water interruption at flowering stage; H_1, H_2 and H_3 indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha^{-1} humic acid foliar application, respectively Different letters indicate significant difference at $P \leq 0.01$ according to Tukey's test

قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث شد که عملکرد زیستی، عملکرد روغن و عملکرد پروتئین به‌ترتیب ۲۱، ۳۰ و ۱٤ درصد کاهش پیدا کنند (جدول ۷). اگرچه مصرف سیلیکون در شرایط آبیاری کامل تاثیر معنی‌داری بر عملکرد بیولوژیک نداشت ولی در شرایط تنش کمبود آب در مرحله گلدهی، مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون، عملکرد زیستی را به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) بهبود بخشید (جدول ۷). این درحالی‌است که مصرف سیلیکون هم در شرایط آبیاری محدود و هم در شرایط آبیاری کامل به بهبود عملکرد روغن و پروتئین انجامید. در شرایط آبیاری محدود، مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون باعث شد که عملکرد روغن و پروتئین به‌ترتیب ٤٤ و ٦۰ درصد بهبود یابد (جدول ۷).

Table 7: Mean comparison for the effect of silicon foliar application on biological yield, oil yield and protein yield of sesame under two irrigation treatments

Irrigation	Silicon (mM)	Biological yield (kg ha^{-1})	Oil yield (kg ha^{-1})	Protein yield (kg ha^{-1})
I_1	0.0	4143ab	660c	259c
I_1	1.0	4298a	724b	288b
I_1	2.0	4529a	782a	325a
I_2	0.0	2965c	415f	191d
I_2	1.0	3345c	507e	251c
I_2	2.0	3879b	599d	306ab

I_1: Full irrigation; I_2: water interruption at flowering stage
Different letters in each column indicate significant difference according to Tukey's test

نتایج نشان‌داد که بیشترین عملکرد روغن و پروتئین (کیلوگرم در هکتار) کنجد با مصرف شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون به‌دست‌آمد (شکل ۲ و شکل ۳) به‌طوری‌که عملکرد روغن و پروتئین کنجد در این تیمارها به‌ترتیب ۶۰ و ۸۲ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک و سیلیکون بود. بااین‌حال، در تمامی سطوح مصرف اسید هیومیک، مصرف سیلیکون باعث بهبود عملکرد روغن و پروتئین شد (شکل ۲ و شکل ۳).

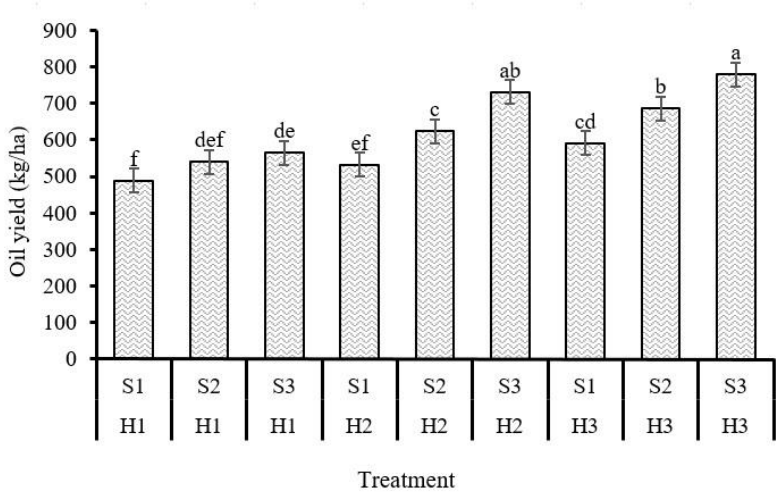

Fig. 2: Oil yield (kg ha^{-1}) of sesame in different treatments of humic acid and silicon
H_1, H_2 and H_3 indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha^{-1} humic acid foliar application, respectively S_1, S_2 and S_3 indicate 0.0, 1.0 and 2.0 mM silicon foliar application, respectively Different letters indicate significant difference at P≤0.01 according to Tukey's test

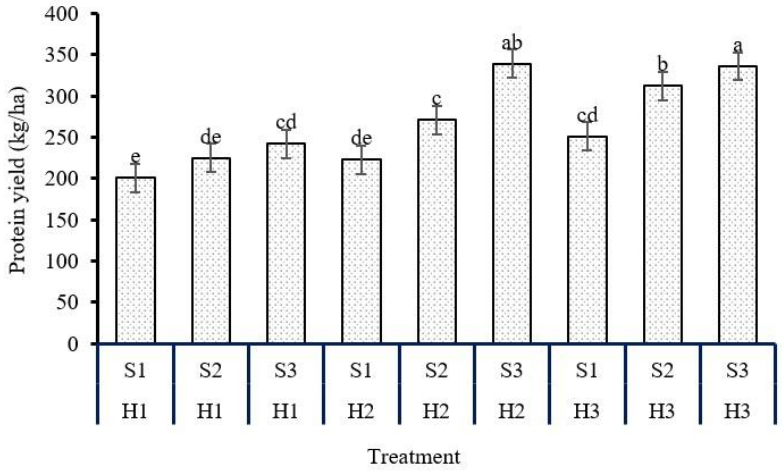

Fig. 3: Protein yield (kg ha^{-1}) of sesame in different treatments of humic acid and silicon.
H_1, H_2 and H_3 indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha^{-1} humic acid foliar application, respectively. S_1, S_2 and S_3 indicate 0.0, 1.0 and 2.0 mM silicon foliar application, respectively. Different letters indicate significant difference at P≤0.01 according to Tukey's test

بیشترین عملکرد دانه‌ی کنجد (۱۶۰۶ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری کامل و مصرف شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و دو میلی‌مولار سیلیکون به‌دست‌آمد (**جدول ۸**). قطع آبیاری در مرحله گلدهی در شرایط عدم مصرف اسید هیومیک و سیلیکون، کمترین عملکرد دانه (۷۸۰ کیلوگرم در هکتار) را داشت که حدود ۵۰ درصد کم‌تر از بهترین تیمار بود. مصرف اسید هیومیک و سیلیکون، عملکرد دانه را در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی بهبود بخشید و هر چه مصرف آن‌ها افزایش پیدا کرد، مقدار بیشتری از اثرات منفی کمبود آب بر تولید دانه کنجد جبران‌شد (**جدول ۸**). به‌طوری‌که مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون در سطوح صفر، سه و شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک، عملکرد دانه را به‌ترتیب ۲۱، ۶۰ و ۳۶ درصد افزایش داد (**جدول ۸**).

بیشترین بهره‌وری آب کنجد (تولید ۰/۷۵۶ کیلوگرم دانه با مصرف یک متر مکعب آب) در تیمار قطع آبیاری و مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون و شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به‌دست‌آمد (**جدول ۸**). به‌طورکلی، در تیمارهای قطع آبیاری، دانه‌ی بیشتری به‌ازای مصرف هر واحد آب به‌دست‌آمد. کمترین میزان بهره‌وری آب کنجد (تولید ۰/۳۱۷ کیلوگرم دانه با مصرف یک متر مکعب آب) در تیمار آبیاری کامل و عدم مصرف اسید هیومیک و سیلیکون ثبت شد. همچنین، در تمامی سطوح اسید هیومیک، با مصرف سیلیکون، بهره‌وری آب کنجد بهبود پیدا کرد (**جدول ۸**).

Table 8. Mean comparison for the effect of humic acid and silicon foliar application on grain yield and water productivity of sesame under two irrigation treatments

Irrigation	Humic acid (kg ha^{-1})	Silicon (mM)	Grain yield (kg ha^{-1})	Water productivity (Kg m^{-3})
I_1	0.0	0.0	1240fg	0.317i
I_1	0.0	1.0	1290efg	0.333hi
I_1	0.0	2.0	1340def	0.343hi
I_1	3.0	0.0	1360def	0.353gh
I_1	3.0	1.0	1425bcd	0.367gh
I_1	3.0	2.0	1550ab	0.403f
I_1	6.0	0.0	1380cde	0.357gh
I_1	6.0	1.0	1500abc	0.387fg
I_1	6.0	2.0	1606a	0.413f
I_2	0.0	0.0	780l	0.417f
I_2	0.0	1.0	920jk	0.500d
I_2	0.0	2.0	950ijk	0.523d
I_2	3.0	0.0	840kl	0.460e
I_2	3.0	1.0	1075hi	0.583c
I_2	3.0	2.0	1350def	0.737a
I_2	6.0	0.0	1030ij	0.560c
I_2	6.0	1.0	1180gh	0.637b
I_2	6.0	2.0	1400cde	0.757a

I_1: Full irrigation; I_2: water interruption at flowering stage
Different letters in each column indicate significant difference according to Tukey's test

براساس نتایج پژوهش، عملکرد و اجزای عملکرد دانه‌ی کنجد با قطع آبیاری در مرحله گلدهی دچار کاهش می‌شود. یافته‌های تحقیق نشان داد که علی‌رغم اینکه کنجد یک گیاه مناطق خشک و نیمه‌خشک و مقاوم به تنش خشکی معرفی شده‌است (Kouighat *et al.*, 2024)، ولی به‌وقوع تنش خشکی در مرحله گلدهی حساسیت دارد. نتایج آشکار نمود که عملکرد دانه‌ی کنجد متاثر از هر دو جزء مهم عملکرد (تعداد دانه و وزن دانه) است چرا که کمبود آب در مرحله گلدهی هم وزن و هم تعداد دانه‌ی کنجد را کاهش داد. حساسیت تعداد دانه به تنش خشکی بیشتر از وزن دانه بود، زیرا با اعمال قطع آبیاری در مرحله گلدهی، وزن دانه با کاهش حدود نه درصدی ولی تعداد دانه در بوته حدود ۴۰ درصد کاهش یافت. در کلزا قطع آبیاری در مرحله گلدهی تعداد دانه در بوته را ۱۰ درصد بیشتر از وزن دانه کاهش داد (Kazemi and Eskandari, 2024) که با نتایج تحقیق کنونی هماهنگی دارد. اگر چه هم عملکرد دانه و هم عملکرد زیستی با قطع آبیاری دچار کاهش شدند، ولی به‌نظر

می‌رسد افت شاخص برداشت بیشتر به‌دلیل کاهش تولید دانه در شرایط تنش خشکی بود، چرا که کمبود آب عملکرد دانه را بیش از عملکرد زیستی (به‌ترتیب کاهش ۲۵ و ۲۰ درصدی) کاهش داد. در کنجد عملکرد دانه، تعداد و وزن دانه و ارتفاع بوته صفات مرتبط با هم هستند که افزایش هر کدام از عوامل، به افزایش سایر صفات منجر می‌گردد (Jahan and Amiri, 2018) که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی‌دارد. مصرف سیلیکون و اسید هیومیک به بهبود صفات تعداد و وزن دانه و ارتفاع بوته کنجد انجامید که بر اساس آن، می‌توان افزایش عملکرد دانه کنجد با مصرف سیلیکون و اسید هیومیک را به بهبود اجزای عملکرد دانه (وزن و تعداد دانه) و ارتفاع بوته (که پتانسیل بیشتری برای تولید دانه در یک بوته کنجد فراهم می-آورد) نسبت‌داد. افزایش غلظت کلروفیل توسط اسید هیومیک (Heidari *et al.*, 2020) و تقویت انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی توسط سیلیکون (Khodabandehloo *et al.*, 2014) در افزایش وزن و تعداد دانه (Aghaei *et al.*, 2023) نقش موثری دارد که منجربه افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش می‌شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

میزان پروتئین و روغن دانه کنجد به‌ترتیب افزایش و کاهش یافت و یک رابطه‌ی منفی بین درصد پروتئین و روغن دانه‌ی کنجد مشاهده‌شد. چنین رابطه‌ای در آفتابگردان نیز گزارش شد (Gholinezhad *et al.*, 2013). اثر تنش خشکی ناشی از قطع آبیاری بر درصد روغن دانه‌ی کنجد تا حدودی کم (حدود هفت درصد) بود. تولید روغن در گیاهان روغنی صفتی است که توسط چند ژن کنترل می‌شود و تنش کمبود آب ممکن است بر همه ژن‌ها تاثیر نگذارد، به‌همین‌دلیل اثرات کاهشی تنش خشکی بر درصد روغن دانه ممکن است ناچیز باشد (Yadollahi *et al.*, 2017). بااین‌حال، از آن‌جا که افت عملکرد روغن در شرایط تنش خشکی قابل ملاحظه بود (حدود ٤٤ درصد) می‌توان نتیجه‌گرفت که اثر کاهشی تنش خشکی بر تولید روغن کنجد عمدتاً از طریق تاثیر منفی آن بر عملکرد دانه حاصل شده‌است. در مطالعات دیگر، همبستگی مثبت بین عملکرد روغن با درصد روغن و عملکرد دانه در کنجد گزارش شده‌است (Kazemi *et al.*, 2023) که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت‌دارد. علی‌رغم اینکه در شرایط تنش خشکی، درصد پروتئین دانه حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا کرد ولی پاسخ عملکرد پروتئین به کمبود آب کاهشی بود به‌طوری‌که با قطع آبیاری، عملکرد پروتئین دانه‌ی کنجد حدود ۱۵ درصد کاهش یافت که نشان‌می‌دهد عملکرد پروتئین دانه‌ی کنجد بیش از آن‌که تحت تاثیر درصد پروتئین دانه قرار بگیرد، از عملکرد دانه متاثر می‌شود. نتایج مشابهی در مورد اثر تنش خشکی بر درصد و عملکرد پروتئین دانه‌ی سویا گزارش شده‌است (Vahdi *et al.*, 2015).

بهره‌وری آب کنجد در شرایط قطع آبیاری و مصرف اسید هیومیک و سیلیکون بهبود یافت. این بدان معنی‌است که کنجد توانسته‌است در این شرایط به‌ازای هر واحد آب مصرفی، دانه بیشتری تولید کند. با اعمال تیمار قطع آبیاری عملکرد دانه ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت، ولی مصرف آب در مجموع ۳٦ درصد کم‌تر شد که به بهبود بهره‌وری آب انجامید. قطع آبیاری در مرحله گلدهی در کلزا باعث‌شد که مصرف آب حدود ۲۸۰۰ متر مکعب در هکتار کاهش پیدا کند که در نتیجه آن بهره‌وری آب نیز ۳۵ درصد افزایش یافت (Kazemi and Eskandari, 2024) که با مطالعه کنونی مطابقت دارد. در پنبه، کمبود آب از طریق آبیاری شیاری یک در میان باعث شد که به ازای مصرف هر واحد آب مصرف، ۳/۰۵ کیلوگرم دانه تولید شود که به‌تبع آن، بهره‌وری آب ۵۷ درصد بهبودیافت ((Pinnamaneni *et al.*, 2020). به‌طورکلی، این نتایج بر بهبود بهره‌وری آب در شرایط کاهش آبیاری تاکید دارد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. افزایش بهره‌وری آب در شرایط تنش خشکی با مصرف اسید هیومیک و سیلیکون به اثر مثبت آنها بر تولید دانه ربط داده شده‌است، به‌عبارت‌دیگر، این ترکیبات می‌توانند در شرایط تنش خشکی سبب بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد دانه شوند که به‌تبع آن بهره‌وری آب نیز افزایش می‌یابد (Pourmorad *et al.*, 2018). فواید اسید هیومیک و سیلیکون برای بهبود رشد گیاه در شرایط تنش خشکی به اثرات مثبت آنها بر رشد ریشه و افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان (Heidari *et al*, 2020) و در نتیجه افزایش تحمل تنش خشکی (Arje *et al.*, 2022) مرتبط دانسته شده‌است.

٤. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، اعمال آبیاری محدود از طریق قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث کاهش تولید دانه و روغن کنجد (به‌ترتیب به‌میزان ۲۵ و ۳۰ درصد) شد. بااین‌حال، از آن‌جاکه در تیمار تنش خشکی، مصرف آب کم‌تر از آبیاری کامل بود، بهره‌وری آب برای تولید دانه در تیمار قطع آبیاری ۵۸ درصد افزایش یافت. اسید هیومیک و سیلیکون نیز با افزایش تحمل کنجد به خشکی، باعث بهبود عملکرد دانه و صفات مرتبط با آن شد. باتوجه‌به اینکه در پژوهش حاضر قطع آبیاری بر اساس شرایط منطقه الزاماً در مرحله گلدهی اعمال شد، نیاز است که اثرات قطع آبیاری در مراحل رشد رویشی نیز بررسی‌شود تا بتوان به این ایده که احتمالاً قطع آبیاری در مرحله رشد رویشی بدون تاثیر جدی بر عملکرد دانه، باعث افزایش بهره‌وری آب در کنجد می‌شود، پاسخ دقیق‌تری داد.

٥. منابع

Aghaei, F., Seyed Sharifi, R. and Farzaneh, S. (2023). The effects of some biofertilizers and nano iron-silicon oxide on yield and grain filling components of triticale (*Triticosecale wittmack*) under water limitation condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2(21), 203-219. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2022.78960.1199

Amiri, A., Bagheri, A.A., Khajeh, M., Najafabadipour, F. and Yadollahi, P. (2013). Effect of silicon foliar application on yield and enzymes antioxidant activity of saffron under deficit irrigation. *Crop Improvement Researches*, 4, 361-372. (In Persian with English abstract).

Arjeh, J., Pirzad, A., Tajbakhsh, M. and Mohammadzadeh, S. (2022). Improving the water use efficiency of sugar beet by vermicompost and phytoprotectants. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 2(32), 1-18. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22034/saps.2021.45156.2659

Asadi, H., Baradaran, R., Seghatoleslami, M.J. and Mousavi, S. G. (2021). Evaluation of drought tolerance in some sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes based on stress tolerance indices. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 4 (18), 413-433. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.88165

Assefa, Y., Purcell, L.C., Salmeron, M., Naeve, S., Casteel, S.N., Kov´ acs, P. and Ciampitti, I.A. (2019). Assessing variation in US soybean seed composition (protein and oil). *Frontiers in Plant Science*, 10 (298) https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00298

Baghery, M.B., Kazemitabar, S. K., Dehestani, A., Mehrabanjoubani, P. and Najaf Zarrini, H. (2022). Assessment of agro-morphological traits and yield-based tolerance indices in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes under drought stress. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 82(3), 324–332. https://doi.org/10.31742/ISGPB.82.3.7.

Chen, H., Huang, X., Chen, H., Zhang, S., Fa, C., Fu, T., He, T. and Gao, Z. (2024). Effect of silicon spraying on rice photosynthesis and antioxidant defense system on cadmium accumulation. *Scientific Report*, 14, 15265. https://doi.org/10.1038/s41598-024-66204-9

Dahie Zehi, F., Ramroudi M. and Raissi, A. (2021). Investigation of some morphological traits, yield, yield components, and oil percentage of sesame genotypes under drought stress conditions. *Journal of Crop Improvement*, 1(24), 41-51. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2021.316826.2499

Dossa, K., Li, D., Wang, L., Zheng, X., Liu, A., Yu, J., Wei, X., Zhou, R., Fonceka, D., Diouf, D., Liao, B., Cissé, N. and Zhang, X. (2017). Transcriptomic, biochemical and physio-anatomical investigations shed more light on responses to drought stress in two contrasting sesame genotypes. *Scientific reports*, 7: 8755.

Eskandari, H. and Alizadeh-Amraie, A. (2018). Effect of planting pattern and alternate furrow irrigation on productivity of water and land under wheat and Persian clover intercropping. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32, 179-187. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/jwra.2018.116952

Gholinezhad, S., Darvishzadeh, R. and Bernoosi, I. (2013). Effects of drought stress on grain qualitative traits in Iranian confectionary sunflower (*Helianthus annuus* L.) landraces. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2(2). 9-20. (In Persian with English abstract).

Heidari, M., Goleg, M., Ghorbani, H. and Baradaran Firouzabad, M. (2016). Effect of drought stress and foliar application of iron oxide nanoparticles on grain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 4(46), 619-628. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56811

Heidari, M., Paydar, A., Baradaran Firozabad, M. and Abedinin Esfahani, M. (2020). The Effect of drought stress and application of humic on quantitative yield, photosynthetic pigments, and mineral nutrients content in sunflower seeds. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 4(50), 51-62. https://doi.org/ 10.22059/IJFCS.2018.253008.654448

Jahan, M and Amiri, M.B. (2018). Determining the effective factors in water use efficiency (WUE) of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), sesame (*Sesamum indicum* L.) and maize (*Zea mays* L.) in response to humic acid application and deficit irrigation. *Journal of Water and Soil Science*, 3(22), 373-394. (In Persian with English abstract). https://doi.org.10.29252/jstnar.22.3.373

Jahan, M., Amiri, M.B., Naseri Abkooh, N. and Salehabadi, M. (2020). Factor analysis of water use efficiency and some quantitative characteristics and yield in sesame (*Sesamum indicum* L.) affected by application of nitrogen and ecological inputs in conditions of drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 1(27), 19-39. **(**In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/jopp.2020.14585.2309

Kalantari, E., Armin, M. and Marvi, H. (2021). Effects of irrigation cut-off in different stages on yield and yield components of sesame cultivars. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 151-162. (In Persian with English abstract).

Karimi, E. and Tadayyon, A. (2018). Effect of humic acid spraying on yield and some morphological characteristic of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Applied Research in Field Crops*, 1(31), 20-38. **(**In Persian with English abstract).

Kazemi, K and Eskandari, H. (2024). Evaluation of rapeseed production and water use efficiency in irrigation regimes and vermicompost levels in different planting dates. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 1(22), 103-120. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.83981.1263

Kazemi, K., Eskandari, H. and Mosavian, S.N. (2023). The response of grain and oil production and water productivity of sesame to limited irrigation under the conditions of vermicompost application. *Journal of Crop Production and Processing*, 2(13), 73-85. (In Persian with English abstract). https://doi.org/ 10.47176/jcpp.13.2.37781

Khodabandehloo, S., Sepehri, A., Ahmadvand, G. and Keshtkar, A.H. (2014). The effect of silicon application on grain yield of millet and water use efficiency under drought stress. *Journal of Crop Improvement*. (2(16), 399-416. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jci.2014.53051

Kouighat, M., Kettani R., El-Fechtali, M. and Nabloussi, A. (2024). Exploring mechanisms of drought-tolerance and adaptation of selected sesame mutant lines. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100911.

Pazoki, A. (2016). Effects of humic acid and plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) on yield and yield components of durum wheat under drought stress condition in Shahr-e-Rey region. *Cereal Research*, 1(6), 105-117. In Persian with English abstract).

Pinnamaneni, S.R., Anapalli, S.S., Reddy, K.N. and Fisher, D.K. (2020). Effects of irrigation and planting geometry on cotton productivity and water use efficiency. *Journal of Cotton Science*, 24, 87-96. https://doi.org/10.56454/QOWP3595

Pourmorad, M., Malakouti, M. and Tehrani, M.M. (2018). Study on the effect of humic acid and fulvic acid on the wheat yield and water use efficiency under drought stress. *Journal of Water and Soil*, 5(32), 977-985. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v32i5.71191

Singh, B., Kaur G., Quintana-Ashwell, N.E., Singh, G., Himlo, T. and Nelson, K. (2023). Row spacing and irrigation management affect soybean yield, water use efficiency and economics, *Agricultural Water Management*, 277, 108088. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108087

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., and Dubey, N. K. (2016). Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultiver and hybrid differing in Arsenate tolerance. *Frontiers in Environmental Science, 46*(4), 1-14. https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00046

Vahdi, N., Gholinezhad, E., Mansourifard, S., Gheyrati Arani, L. and Rahimi, M. (2015). Effect of drought stress on seed yield, oil and protein of soybean (*Glycine max* L.) different cultivars. *Journal of oil Plants Production*, 2(1), 99-113. (In Persian with English abstract).

Yadollahi, P., M. R. Asgharipour, H. Marvane, N. Kheiri, and A. Amiri. (2017). The effects of drought stress on grain and oil yield of two cultivars of sunflower. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions* 1, 65-76. (In Persian with English abstract). https://doi.org/ 10.22034/csrar.01.01.06

Yemata, G. and , Bekele T. (2024). Evaluation of sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties for drought tolerance using agro morphological traits and drought tolerance indices. *PeerJournal*, 12, 16840. http://doi.org/10.7717/peerj.16840

Zhao, H., T. Dai, D. Jiang and W. Cao. (2008). Effects of high temperature on key enzymes involved in starch and protein formation in grains of two wheat cultivars. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 194, 47-54.