

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 Eskandari², 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.

Key words: 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

بهبود بهره‌وری آب در شرایط قطع آبیاری در مرحله 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^{۱*} و حمداله اسکندری^۲

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 دانه کنجد، آزمایشی به صورت اسپلیت-فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه پیام نور شهرستان شادگان، استان خوزستان در سال زراعی ۱۴۰۱-۴۰۲ اجرا گردید. عامل‌های آزمایش شامل آبیاری (آبیاری معمول و قطع آبیاری در مرحله 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) به صورت فاکتوریل (سه در سه) در کرت فرعی قرار گرفتند. 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 به ترتیب 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 به ترتیب ۲۰، ۵۲، ۶۴، ۱۸، ۴ و ۱۱ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک بود. نتایج مشابهی در مورد مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون ثبت شد. مصرف شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و به همراه دو میلی‌مولار سیلیکون باعث افزایش عملکرد روغن و پروتئین به میزان ۶۰ و ۸۲ درصد شد. بیشترین بهره‌وری آب کنجد (۰/۷۵۶ کیلوگرم بر متر مکعب) در تیمار قطع آبیاری و مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون و شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک به دست آمد. در نهایت می‌توان اعلام کرد 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 مرحله گلدهی کنجد در پاسخ به کاربرد اسید

هیومیک و سیلیکون، مجله فناوری 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 چاپی: ۲۴۷۶-۶۳۲۱

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۶-۵۶۵۱

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 (Bagheri et al., 2022)، پتانسیل افزودن بر تولید روغن کشور را داراست. کنجد یکی از قدیمی‌ترین گیاهان دانه روغنی است که با ۴۴-۵۷ درصد روغن، ۱۸-۲۵ درصد پروتئین و ۱۴-۱۳ درصد فیبر، ارزش غذایی بالایی دارد (Yemata and Bekele, 2024).

اگرچه کنجد نسبت به 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 کاهش می‌دهد (Asadi et al., 2021). مطالعه برنامه آبیاری کنجد با استفاده از تشتک تبخیر (۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر)، نشان داد 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 به ترتیب ۱۲، ۲۷ و ۱۲ درصد کاهش پیدا کردند (Heidari et al., 2016). نتایج حاصل از تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که میزان حساسیت کنجد به روش اعمال تنش خشکی باید به‌طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد.

یکی از نهاده‌ها برای بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاهان زراعی اسیدهای آلی است و اسید هیومیک یکی از آنها به‌شمار می‌رود. اسید هیومیک به دلیل اثرات شبه‌هورمونی اثرات مفیدی در افزایش تولید گیاهان زراعی دارد (Heidari et al., 2020) و به‌عنوان یک نهاده بوم‌سازگار شناخته می‌شود. 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 (تأمین 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 ۴۰ 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). به‌نظر می‌رسد، 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 افزایش دهد. 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 غلاف‌بندی)، باعث بهبود چهار درصد 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 به دلایل مختلف (از جمله محدودیت دسترسی به آب آبیاری) قادر به کشت برنج نمی‌باشند، به زراعت کنجد اقدام می‌کنند. با این حال، محصولات زراعی دیگری نیز از جمله ذرت، ماش، لوبیا و هندوانه همزمان با کنجد کشت می-

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 گرم و خشک بوده و متوسط دما و بارندگی سالانه آن به ترتیب ۲۸/۸ درجه سانتی گراد و ۱۲۰ میلی متر می باشد. 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 شده است.

شوند. به همین دلیل، ممکن است در مراحل مختلف رشد کنگد (از جمله گلدهی) نوبت آبیاری الزاماً به گیاه دیگر اختصاص پیدا کند. در این صورت کنگد با کم آبیاری مواجه می شود. از آنجاکه تاکنون اثرات قطع آبیاری در مرحله گلدهی بر تولید و کیفیت دانه‌ی کنگد به خوبی بررسی نشده است، در پژوهش حاضر کوشش شد تا ضمن بررسی اثر تنش خشکی بر تولید کنگد، اثرات احتمالی محلول پاشی اسید هیومیک و سیلیکون در کاهش اثرات منفی تنش خشکی مورد بررسی قرار گیرد.

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

Depth (cm)	Texture	EC (ds m ⁻¹)	pH	K ₂ O (mg kg ⁻¹)	P ₂ O 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

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 زده شد. 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) تهیه شدند. هر کرت شامل شش ردیف کاشت (فاصله بین ردیف ۵۰ و فاصله روی ردیف پنج سانتی-متر) به طول چهار متر بود. برای اطمینان از سبز شدن بذرها، کشت با تراکم بالا در ۱۰ تیرماه انجام گرفت. سپس، در مرحله استقرار گیاهچه‌ها (مرحله چهاربرگی) کرت‌ها تا تراکم مطلوب (۴۰ بوته در متر مربع) تنک شدند. در طول دوره رشد، علف‌های هرز به صورت دستی کنترل شدند. در هر مرحله از آبیاری، حجم آب آبیاری با استفاده از کنتور محاسبه و برای محاسبه

آزمایش به صورت اسپلیت-فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل‌های آزمایش شامل آبیاری در دو سطح (I₁: آبیاری معمول و I₂: قطع آبیاری در مرحله‌ی گلدهی) در کرت اصلی و اسید هیومیک و سیلیکون به صورت فاکتوریل (سه درسه) در کرت فرعی قرار گرفتند. اسید هیومیک (تولید شده توسط شرکت اکسیر دانش آبادیس) در سه سطح شامل بدون محلول پاشی و غلظت‌های سه و شش کیلوگرم در هکتار و سیلیکون (به صورت مونوسیلیک اسید H₄SiO₄ ساخت شرکت فرمولایف) در سه سطح شامل بدون محلول پاشی و غلظت‌های یک و دو میلی مولار به صورت محلول پاشی در دو مرحله (مرحله ۸-۶ برگی و قبل از گلدهی) به کار رفتند. یک کرت زمانی به گل رفته در نظر گرفته شد که حداقل ۵۰ درصد از بوته‌های کرت به گل رفته باشد (Kalantari et al., 2021). جهت اطمینان از عدم تبخیر محلول‌های غذایی توسط آفتاب، محلول پاشی پس از غروب

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

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{WP} = [Y/I]$$

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 اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری عملکرد روغن، ابتدا درصد روغن دانه (استفاده از حلال و دستگاه سوکسله) اندازه‌گیری شد و سپس شاخص‌های درصد روغن دانه و عملکرد دانه محاسبه شد. برای اندازه‌گیری درصد پروتئین دانه، ابتدا میزان نیتروژن دانه با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه‌گیری شد. سپس، میزان نیتروژن دانه در عدد ۵/۷ ضرب گردید (Zhao et al., 2008). برای تجزیه داده‌ها، نرم‌افزارهای Excel و MSTATC به کار رفت. میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی مقایسه شدند.

۳. نتایج و بحث

نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان‌داد 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 ($P \leq 0.01$) بود. برهمکنش آبیاری در اسید هیومیک تنها بر صفات عملکرد دانه، شاخص برداشت، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین تاثیر معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشت. صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین به‌طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) تحت تاثیر برهمکنش آبیاری در سیلیکون قرار گرفتند ولی سایر صفات به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر این اثر متقابل قرار نگرفتند (جدول ۳). برهم‌کنش اسید هیومیک در سیلیکون بر صفات عملکرد دانه، عملکرد روغن، بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین معنی‌دار ($P \leq 0.01$) 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 ($P \leq 0.01$) 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 نسبت به مقدار اولیه بیشتر شد (جدول ۴). باین‌حال، 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 ۴).

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، ۶۴، ۱۸، ۴ 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 کنگد منجر شد (جدول ۶). 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، ۶، ۴ و ۱۳ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف سیلیکون بود (جدول ۶).

در شرایط آبیاری معمول (غیرتنش) مصرف اسید هیومیک شاخص برداشت را به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار نداد ولی با قرار گرفتن کنگد در شرایط قطع آبیاری، میزان شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری بهبود پیدا کرد به‌طوری‌که، با محلول‌پاشی شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک، شاخص برداشت نسبت به 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 کنگد 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 $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ 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. I₁: Normal irrigation, I₂: 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

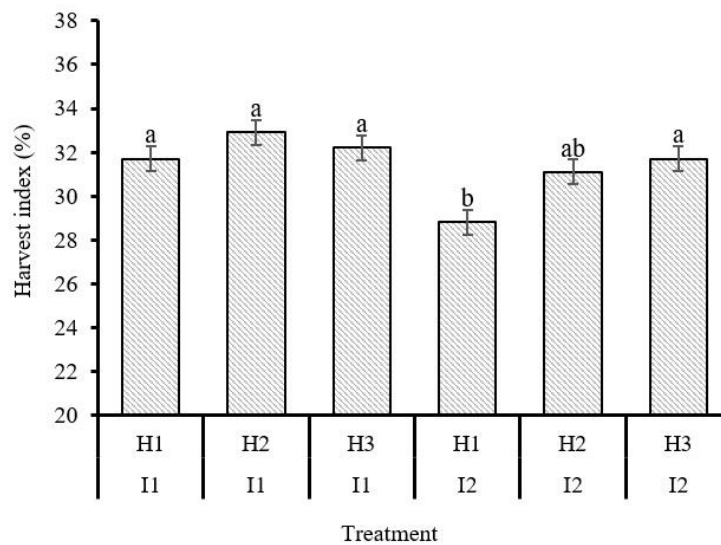


Fig. 1: Harvest index (%) of sesame in different irrigation and humic acid treatments

I₁: Full irrigation; I₂: water interruption at flowering stage; H₁, H₂ and H₃ indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha⁻¹ humic acid foliar application, respectively Different letters indicate significant difference at P≤0.01 according to Tukey's test

طور معنی‌داری (P≤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 به ترتیب ۴۴ و ۶۰ درصد بهبود یابد (جدول ۷).

قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث شد که عملکرد زیستی، عملکرد روغن و عملکرد پروتئین به ترتیب ۲۱، ۳۰ و ۱۴ 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 به-

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

I₁: Full irrigation; I₂: water interruption at flowering stage

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

کنجد در این تیمارها به ترتیب ۶۰ و ۸۲ درصد بیشتر از تیمار عدم مصرف اسید هیومیک و سیلیکون بود. با این حال، در تمامی سطوح مصرف اسید هیومیک، مصرف سیلیکون باعث بهبود عملکرد روغن و پروتئین شد (شکل ۲ و شکل ۳).

نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد روغن و پروتئین (کیلوگرم در هکتار) کنجد با مصرف شش کیلوگرم در هکتار اسید هیومیک و مصرف دو میلی مولار سیلیکون به دست آمد (شکل ۲ و شکل ۳) به طوری که عملکرد روغن و پروتئین

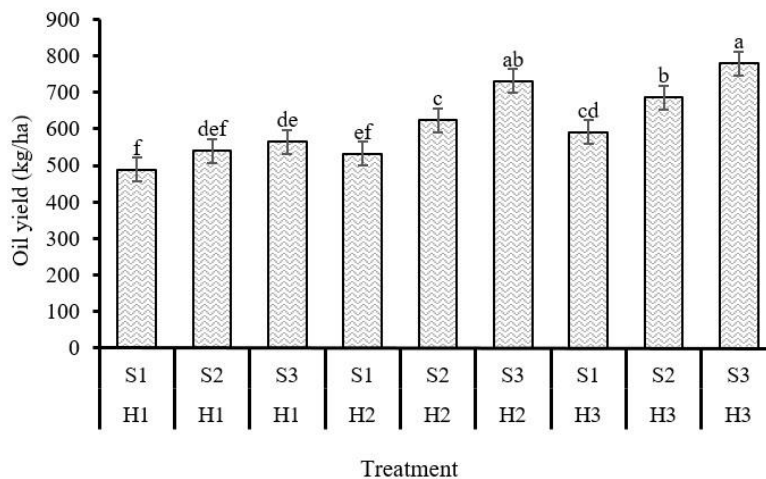


Figure 2. Oil yield (kg ha⁻¹) of sesame in different treatments of humic acid and silicon

H₁, H₂ and H₃ indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha⁻¹ humic acid foliar application, respectively. S₁, S₂ and S₃ 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

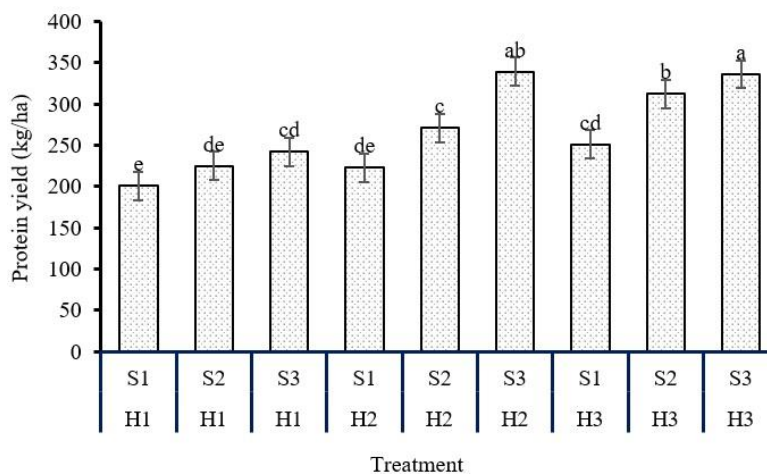


Figure 3. Protein yield (kg ha⁻¹) of sesame in different treatments of humic acid and silicon.

H₁, H₂ and H₃ indicate 0.0, 3.0 and 6.0 kg ha⁻¹ humic acid foliar application, respectively. S₁, S₂ and S₃ 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

هکتار اسید هیومیک، عملکرد دانه را به ترتیب 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). به‌طور کلی، 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).

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 جبران شد (جدول ۸). به‌طوری‌که مصرف دو میلی‌مولار سیلیکون در سطوح صفر، سه و شش کیلوگرم در

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

I₁: Full irrigation; I₂: water interruption at flowering stage

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

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

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 متأثر از هر دو جزء مهم عملکرد (تعداد دانه و وزن دانه) است چرا که کمبود آب در مرحله گلدهی هم وزن و هم تعداد

ولی پاسخ عملکرد پروتئین به کمبود آب کاهشی بود به طوری که با قطع آبیاری، عملکرد پروتئین دانه‌ی کنجد حدود ۱۵ درصد کاهش یافت که نشان می‌دهد عملکرد پروتئین دانه‌ی کنجد بیش از آن که 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 شده است (Vahdi et al., 2015).

بهره‌وری آب کنجد در شرایط قطع آبیاری و مصرف اسید هیومیک و سیلیکون بهبود یافت. این بدان معنی است که کنجد توانسته است 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 ۳۶ درصد کم‌تر شد که به بهبود بهره‌وری آب انجامید. قطع آبیاری در مرحله گلدهی در کلزا باعث شد 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 شباری یک در میان باعث شد که به‌ازای مصرف هر واحد آب مصرف، ۳/۰۵ کیلوگرم دانه تولید شود که به تبع آن، بهره‌وری آب ۵۷ درصد بهبود یافت (Pinnamaneni et al., 2020). به‌طور کلی، 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 شده است، به عبارت دیگر، این ترکیبات می‌توانند در شرایط تنش خشکی سبب بهبود رشد گیاه و افزایش عملکرد دانه شوند که به تبع 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 شده است.

می‌رسد افت شاخص برداشت بیشتر به دلیل کاهش تولید دانه در شرایط تنش خشکی بود، چرا که کمبود آب عملکرد دانه را بیش از عملکرد زیستی (به ترتیب 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 همخوانی دارد. 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 می‌آورد) نسبت داد. 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 منجر به افزایش عملکرد دانه در شرایط تنش می‌شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. میزان پروتئین و روغن دانه کنجد به ترتیب افزایش و کاهش یافت و یک رابطه‌ی منفی بین درصد پروتئین و روغن دانه‌ی کنجد مشاهده شد. 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، به همین دلیل اثرات کاهشی تنش خشکی بر درصد روغن دانه ممکن است ناچیز باشد (Yadollahi et al., 2017). با این حال، از آنجا که افت عملکرد روغن در شرایط تنش خشکی قابل ملاحظه بود (حدود ۴۴ درصد) می‌توان نتیجه گرفت که اثر کاهشی تنش خشکی بر تولید روغن کنجد عمدتاً از طریق تاثیر منفی آن بر عملکرد دانه حاصل شده است. در مطالعات دیگر، همبستگی مثبت بین عملکرد روغن با درصد روغن و عملکرد دانه در کنجد گزارش شده است (Kazemi et al., 2023) که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت دارد. علی‌رغم اینکه در شرایط تنش خشکی، درصد پروتئین دانه حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا کرد

۴. نتیجه‌گیری کلی

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 کنگد می‌شود، پاسخ دقیق‌تری داد.

در این پژوهش، اعمال آبیاری محدود از طریق قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث کاهش تولید دانه و روغن کنگد (به‌ترتیب به‌میزان ۲۵ و ۳۰ درصد) شد. با این حال، 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 کنگد به

۵. 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/jcsc.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/jcsc.2020.88165>
- Assefa, Y., Purcell, L.C., Salmeron, M., Naeve, S., Casteel, S.N., Kovács, 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>
- Bagheri, 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 Abkooch, 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/jcsc.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 cultivar and hybrid differing in Arsenate tolerance. *Frontiers in Environmental Science*, 4(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.