Plant Prod., 2026, 48(4), 585 – 605
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48974.2253
Received: 08 February 2025
Accepted: 24 May 2025

Plant Productions

Research Article

Effect of silica and cytokinin on seed yield and some physiological properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under water deficit stress conditions

Ali Mohammadi Kharkeshi[1], Elyas Rahimi Petroudi[2*], Fazl Shirdel Shahmiri[2], Hamid Reza Mobasser[2], Ali Reza Daneshmand[2]

1. Ph.D. Student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran
2. Assistant Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

Citation: Mohammadi Kharkeshi, A., Rahimi Petroudi, E., Shirdel Shahmiri, F., Mobasser, H.R. Daneshmand, A.R. (2026). Effect of silica and cytokinin on seed yield and some physiological properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) under water deficit stress conditions. *Plant Productions,* 48(4), 585–605.

Abstract

Introduction

Sesame (*Sesamum indicum*) is an important oilseed crop valued for its high oil content, antioxidants, and proteins. Drought is one of the most destructive abiotic constraints, adversely affecting both quantitative and qualitative traits. Silicon has been shown to enhance plant defense mechanisms by stimulating the synthesis of phytoalexins and phenolic compounds under abiotic stress conditions. Similarly, cytokinins play a crucial role in regulating plant growth, maintaining photosynthetic stability, and modulating physiological processes under drought stress. Therefore, this study examines the effects of silicon and cytokinin application on seed yield and physiological traits of sesame grown under water deficit stress conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted in a randomized complete block design with a split-factorial arrangement and three replications during the 2020–2021 and 2021–2022 growing seasons in Sari, Mazandaran Province, northern Iran (36°48′ N, 53°05′ E; 8 m a.s.l.). Irrigation regimes were assigned to the main plots and included irrigation at field capacity (control) and irrigation after 100 mm and 200 mm of evaporation from a Class A pan, representing moderate and severe water deficit stress, respectively. Subplots consisted of a factorial combination of silica application (no silica soil application of calcium silicate at 400 kg ha^{-1}, and foliar application of nano-silica at 60 mg L^{-1}) and cytokinin application (no cytokinin and foliar application of kinetin at 80 mg L^{-1}). Measured traits included chlorophyll and cartenoid content, antioxidant enzyme activities, proline content, silica concentration, oleic and linoleic acid contents, and seed yield.

* **Corresponding Author:** Elyas Rahimi Petroudi
E-mail: e.petroudi@gmail.com

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Results and Discussion

Under severe water deficit conditions, leaf chlorophyll a and chlorophyll b contents decreased by 13.1% and 10.8%, respectively, compared with the control treatment. The highest chlorophyll a content (2.18 and 2.12 mg g^{-1} FW) were recorded following foliar application of nano-silica and kinetin, as well as the combined application of calcium silicate and kinetin, respectively. Under severe water deficit stress, the maximum catalase activity in leaves (0.419 mg EU g^{-1} SP min^{-1}) was observed in plants treated with foliar-applied nano-silica and kinetin. Similarly, under moderate water deficit conditions, the highest guaiacol peroxidase activity (0.287 mg EU g^{-1} SP min^{-1}) was obtained with the same treatments. Across both growing seasons, the maximum proline content was obtained through foliar application of nano-silica; additionally, in the 2021–2022 season, the highest proline concentration (0.442 mg g^{-1} FW) was recorded following kinetin application.The lowest leaf silica content (1064 mg kg^{-1}) was observed under severe water deficit conditions. Foliar application of nano-silica and kinetin increased leaf silica concentration by 38.6% and 11.3%, respectively, compared with the control treatment. Severe water deficit stress significantly increased oleic acid content in sesame oil by 1.3%, while causing a significant reduction in seed yield (32.7%) relative to the control treatment. The highest seed yield (1647 kg ha^{-1}) was obtained from plants receiving foliar nano-silica application. Moreover, foliar application of kinetin led to a significant increase in seed yield by 6.6% compared with the control treatment (1454 kg ha^{-1}).

Conclusion

In general, the interaction among moisture regime, silica, and kinetin did not have a significant effect on sesame seed yield and oil quality. However, under severe water deficit conditions, the concentrations of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, silica, and seed yield were significantly reduced compared with the control treatment, whereas oleic acid content increased. Application of silica (especially nanosilica) and kinetin enhanced chlorophyll b content, leaf silica content, and seed yield. Among the treatments, the combined foliar application of nano-silica and kinetin under moderate and severe water deficit conditions resulted in the highest guaiacol peroxidase and catalase activities in sesame leaves, respectively. Furthermore, nanosilica led to the highest proline content. These findings indicate that foliar application of nano-silica and kinetin not only improves seed yield but also enhances antioxidant defense mechanisms under water deficit conditions, thereby potentially improving drought tolerance in sesame.

Keywords: Antioxidant enzymes, Fatty acid, Foliar application, Nanoparticles, Proline

تولیدات گیاهی، ۱۴۰۴، ۴۸(۴)، ۵۸۵-۶۰۵
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.48974.2253
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

اثر سیلیس و سیتوکینین بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک کنجد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط تنش کم‌آبی

علی محمّدی خارکشی[۱]، الیاس رحیمی پطرودی[۲*]، فضل شیردل شهمیری[۲]، حمیدرضا مبصر[۲]، علیرضا دانشمند[۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر، ایران
۲- استادیار، گروه زراعت، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر، ایران

چکیده

خشکی یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان زراعی تأثیر منفی دارد. سیلیس نقش مهمی در حفاظت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارد. علاوه بر این، هورمون سیتوکینین می‌تواند آسیب‌های ناشی از تنش‌های غیرزیستی را در گیاهان کاهش دهد. این آزمایش به صورت طرح اسپلیت فاکتوریل بر پایهٔ طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال‌های زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰ در شهر ساری انجام شد که شامل رژیم رطوبتی در سه سطح (ظرفیت زراعی و آبیاری پس از ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A) در کرت‌های اصلی، سیلیس (شاهد، سیلیکات کلسیم خاک کاربرد به میزان ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار و محلول‌پاشی نانوسیلیس با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر) و سیتوکینین (شاهد و محلول‌پاشی کینتین با غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر) در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج نشان داد در سطح کم‌آبی شدید، محتوای کلروفیل a و b برگ به ترتیب ۱۳/۱ و ۱۰/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. بیشترین محتوای کلروفیل a با ۲/۱۸ و ۲/۱۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به ترتیب با محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین و کاربرد سیلیکات کلسیم و کینتین به دست آمد. بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز برگ در سطح کم‌آبی شدید با محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین به ۰/۴۱۹ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه رسید. همچنین، بیشترین فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز برگ در سطح کم‌آبی متوسط با استفاده از همین تیمارها (۰/۲۸۷ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) به‌دست آمد. در هر دو سال زراعی، حداکثر محتوای پرولین برگ با محلول‌پاشی نانوسیلیس به دست آمد. همچنین، در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰، حداکثر محتوای پرولین با ۰/۴۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در تیمار محلول‌پاشی کینتین حاصل شد. کم‌ترین غلظت سیلیس برگ (۱۰۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطح کم‌آبی شدید مشاهده شد. محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین غلظت سیلیس برگ را به ترتیب ۳۸/۶ و ۱۱/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. رژیم رطوبتی کم‌آبی شدید سبب افزایش معنی‌دار محتوی اولئیک اسید روغن (۱/۳ درصد) و کاهش معنی‌دار عملکرد دانه (۳۲/۷ درصد) کنجد نسبت به تیمار شاهد شد.

نویسنده مسئول: الیاس رحیمی پطرودی
رایانامه: e.petroudi@gmail.com

بیش‌ترین عملکرد دانهٔ کنجد با ۱۶۴۷ کیلوگرم در هکتار با محلول‌پاشی نانوسیلیس به دست آمد. همچنین، محلول‌پاشی کینتین باعث افزایش معنی‌دار (۶/۶ درصد) عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد شد. برهم‌کنش رژیم رطوبتی با سیلیس و کینتین اثر معنی‌داری بر کیفیت روغن و عملکرد دانه کنجد نداشت. با این حال، در تیمار کم‌آبی شدید، برخلاف اسید اولئیک، محتوای کلروفیل a و b، غلظت سیلیس و عملکرد دانه به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد کاهش یافتند. استفاده از سیلیس (به ویژه نانوسیلیس) و کینتین محتوای کلروفیل b، غلظت سیلیس و عملکرد دانه را افزایش داد. در این میان، محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین در سطوح متوسط و شدید کم‌آبی به ترتیب منجر به بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های گایاکول‌پراکسیداز و کاتالاز شد. علاوه بر این، نانوسیلیس منجر به بالاترین محتوای پرولین شد. براساس نتایج، استفاده از نانوسیلیس و کینتین نه‌تنها به افزایش عملکرد دانه، بلکه به ارتقای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش کم‌آبی و احتمالاً بهبود تحمل گیاه کنجد کمک می‌کند.

کلید واژه‌ها: اسید چرب، آنزیم‌های آنتی اکسیدان، پرولین، محلول‌پاشی، نانوذرات

مقدمه

دانه‌های روغنی از جمله محصولات غذایی ضروری برای مصرف انسان هستند که دو و نیم برابر بیش‌تر از پروتئین و نشاسته، انرژی دارند (Bukhari *et al.,* 2021). کنجد (*Sesamum indicum* L.) به‌دلیل دارا بودن روغن، آنتی‌اکسیدان و پروتئین بالا، یک محصول روغنی مهم است (You *et al.,* 2019).

خشکی یکی از مخرب‌ترین تنش‌های غیرزیستی است که منجر به تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی و کاهش بهره‌وری گیاه می‌شود (Yousefzadeh Najafabadi and Ehsanzadeh, 2019). کاهش رطوبت بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه اثر گذاشته و عملکرد دانه کنجد را کاهش می‌دهد (Gholipur Noveyri *et al.,* 2022; Attar Roshan *et al.,* 2024). رشد و بهره‌وری کنجد در شرایط خشکی، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد یا گلدهی، کاهش می‌یابد (Mehmood *et al.,* 2021). شواهد نشان می‌دهد که تنش خشکی بر صفات کمی و کیفی کنجد اثر معنی‌داری دارد (Misagh *et al.,* 2016; Attar Roshan *et al.,* 2024). برخی محققان نیز گزارش دادند که تنش خشکی با کاهش محتوی رنگدانه‌های فتوسنتزی، رشد و عملکرد کنجد را کاهش می‌دهد (Yousefzadeh Najafabadi and Ehsanzadeh, 2019). تغذیهٔ صحیح گیاه می‌تواند از اثرات زیانبار تنش‌ها جلوگیری کند و به حفظ عملکرد کمک کند (Pezeshk *et al.,* 2023).

سیلیس، یکی از عناصر غذایی مفید برای اکثر گیاهان محسوب می‌شود و تحمل گیاهان را در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند دمای بالا، تابش فرابنفش، سمیت فلزات، کمبود مواد مغذی و کمبود آب افزایش می‌دهد. این تحمل به توانایی سیلیس در سنتز فیتوالکسین‌ها و فنولیک‌ها در واکنش به تنش‌ها باز می‌گردد (Tripathi *et al.,* 2020; Christian *et al.,* 2022). سیلیس پس از اکسیژن دومین عنصر فراوان در خاک است و ۶۰ تا ۷۰ درصد از جرم خاک را به‌صورت SiO_2 تشکیل می‌دهد. این عنصر در جذب و انتقال مواد مغذی و حفاظت گیاهان در برابر تنش‌ها نقش دارد (Christian *et al.,* 2022). نقش سیلیس در کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی در گیاهان روغنی مانند کلزا (Bukhari *et al.,* 2021) و کاملینا (Ahmad *et al.,* 2020) اثبات شده است.

سیتوکینین یکی از پنج هورمون اصلی گیاهی است که چرخهٔ سلولی و رشد و نمو را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Honig *et al.,* 2018). علاوه بر تحریک تقسیم سلولی و رشد، با مهار تجزیه کلروفیل، اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها، و توزیع آمینو-اسیدها، هورمون‌ها و ترکیبات معدنی به دیگر بخش‌های گیاه، از پیری جلوگیری می‌کند (Ullah *et al.,* 2018). سیتوکینین می‌تواند آسیب‌های ناشی از تنش‌های غیرزیستی را کاهش دهد

(Prerostova *et al.,* 2018). سیتوکینین با افزایش محتوای آب برگ‌ها، رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش نشت الکترولیت‌ها، به مقابله با خشکی کمک می‌کند (Salek Mearaji *et al.,* 2020; Golchin *et al.,* 2022).

خشکی و کم‌آبی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی است که کشاورزی جهان با آن مواجه است. بهینه‌سازی مدیریت تغذیهٔ گیاهی، رویکرد بسیار مؤثری برای کاهش اثرات نامطلوب کم‌آبی بر تولید محصولات زراعی محسوب می‌شود. سیلیس، به‌عنوان یک عنصر معدنی سودمند، و سیتوکینین، به‌عنوان یک تنظیم‌کنندهٔ رشد گیاهی، می‌توانند به بهبود تحمل گیاهان در مقابل تنش‌های محیطی مانند کم‌آبی کمک کنند. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سیلیس و سیتوکینین بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک کنجد در شرایط رژیم‌های کم‌آبی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال‌های زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی فیروزکنده انجام شد. محل آزمایش در شش کیلومتری شمال شهر ساری و در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵ دقیقه جنوبی با ارتفاع ۸ متر از سطح دریا واقع شده است. داده‌های هواشناسی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و در سه رژیم رطوبتی مختلف شامل تیمار شاهد (نگهداری رطوبتی خاک در حد ظرفیت مزرعه) و آبیاری پس از ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A (به ترتیب کم‌آبی متوسط و شدید) در کرت‌های اصلی، و سه سطح کاربرد سیلیس (شاهد بدون کاربرد سیلیس، سیلیکات کلسیم و نانوسیلیس) و دو سطح اعمال سیتوکینین (شاهد بدون کاربرد سیتوکینین و محلول‌پاشی کیتین) در کرت‌های فرعی طی دو سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰ اجرا شد. رژیم‌های رطوبتی کم‌آبی پس از سبز شدن شروع و تا زمان برداشت (کدهای رشدی ۰۹ و ۸۸) ادامه داشت. میزان تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A به طور روزانه اندازه‌گیری شد. آبیاری هر تیمار پس از رسیدن میزان تبخیر به مقدار مورد نظر انجام گرفت. جهت اعمال دقیق تیمارهای آبیاری از تأسیسات آبیاری لوله‌کشی شده استفاده گردید. کدهای رشدی کنجد بر اساس سیستم کدبندی BBCH گزارش شده است (Attibayeba *et al.,* 2010).

جدول ۱- داده‌های هواشناسی در طول دورهٔ رشد کنجد

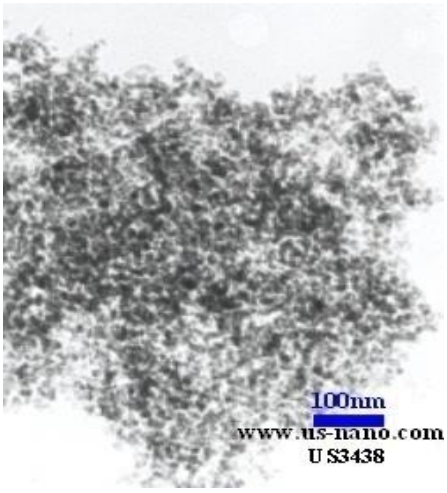
Table 1. Meteorological data during the sesame growing period

	Min. temperature		Max. temperature		Mean temperature		Total rainfall		Total sunshine	
	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022	2020-2021	2021-2022
Months	°C						mm		h	
May	14.1	16.2	24.5	24.7	19.3	20.5	20.7	40.6	187.6	150.1
June	19.5	21.3	31.7	30.7	25.6	26.0	1.9	26.4	290.1	219.5
July	22.2	24.6	32.3	34.0	27.2	29.3	10.7	25.5	66.2	231.5
August	23.1	26.9	31.3	34.2	27.2	29.6	15.9	27.9	161.1	231.7
September	19.9	23.5	30.7	31.8	25.3	27.7	20.6	38.7	250.2	143.1

جدول ۲- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of the experimental soil

pH	Electrical conductivity	Available K	Available P	Total N	Organic matter	Organic carbon	Clay	Silt	Sand	Soil texture
	ds. m^{-1}	mg. kg^{-1}		%						
7.09	0.84	233	6.73	0.018	2.46	1.43	22	34	44	Loam



شکل ۱- تصویر ذرات نانو سیلیس زیر میکروسکوپ الکترونی
Figure 1. SEM image of SiO_2 nanopowder

سیلیکات کلسیم ($CaSiO_3$) به صورت خاک کاربرد و به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت اعمال شد. نانوسیلیس (SiO_2) با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر و کینتین ($C_{10}H_9N_5O$) با غلظت ۸۰ میلی‌گرم در لیتر، به‌صورت جداگانه از ابتدای گل‌دهی (کد رشدی ۶۰) هر دو هفته یک‌بار محلول‌پاشی شدند. این محلول‌پاشی‌ها تا رسیدگی (کد رشدی ۷۹) ادامه داشت و در مجموع سه مرتبه تکرار شدند. برای بهبود جذب هر ترکیب و جلوگیری از تداخل احتمالی اثرات آن‌ها، محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین با فاصلهٔ ۴۸ ساعت از یکدیگر انجام شد. برای افزایش حلالیت کینتین در آب، از اتانول ۷۰ درصد استفاده شد. همچنین، به‌منظور حذف اثرات احتمالی آب و اتانول، در کرت‌های بدون سیتوکینین (شاهد)، محلول آب و اتانول محلول‌پاشی شد (Mahrokh *et al.*, 2019). قطر ذرات نانوسیلیس در محدوده ۲۰ تا ۳۰ نانومتر قرار داشت. تصویر SEM نانوذرات در شکل ۱ نمایش داده شده است. آماده‌سازی مزرعه در اواسط اردیبهشت با شخم و دیسک انجام شد. مزرعه در سه تکرار و هر تکرار شامل ۱۸ کرت آماده شد. تقسیم گردید. هر کرت دارای شش ردیف کاشت با فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متر و طول پنج متر بود. فاصلهٔ بوته‌ها روی هر ردیف، چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با تنک کردن پس از مرحلهٔ چهار برگی (کد رشدی ۱۴) به دست آمد. رقم کنجد مورد مطالعه، ناز تک شاخه بود که از شرکت کشت و توسعه دانه‌های روغنی تهیه شد. این رقم که در سال ۱۳۸۰ از تودهٔ محلی مازندران معرفی شد، دارای بذرهای کرم رنگ با وزن هزار دانه ۲/۶-۲/۹ گرم است (Ghasemipamah *et al.*, 2020). بذر کنجد، پس از مخلوط شدن با ماسه نرم، در جوی‌های کم‌عمق ایجادشده با فوکا پخش شد و سپس با خاک نرم پوشانده شد تا در عمق یک و نیم تا دو سانتی‌متری قرار گیرد. کشت در خاک مرطوب انجام شد تا رطوبت لازم برای جوانه‌زنی و سبز شدن بذر (کد رشدی ۰۹) فراهم شود. عملیات کاشت کنجد در سال‌های زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۰-۴۰۱ به ترتیب در تاریخ‌های ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت انجام شد. بر اساس نتایج تجزیه خاک (جدول ۲)، در تمامی کرت‌ها از کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به میزان ۸۰ کیلوگرم در هکتار پیش از کاشت استفاده شد. همچنین، کود نیتروژن از منبع سولفات آمونیوم به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به صورت تقسیم‌شده در سه مرحله به کار رفت. بر این اساس یک سوم پیش از کاشت، یک سوم در آغاز گلدهی (کد رشدی ۶۰)، و یک سوم در شروع پر شدن دانه (کد رشدی ۷۱) اعمال شد (Haghanian *et al.*, 2019). با توجه به کفایت پتاسیم

موجود در خاک و ظرفیت نگهداری مناسب بافت خاک، نیازی به مصرف کود پتاسیم وجود نداشت (جدول ۲). صفات بررسی شده شامل محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها)، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، آسکوربات‌پراکسیداز و گایاکول‌پراکسیداز)، محتوای پرولین و سیلیس برگ‌ها و محتوای اسید اولئیک و لینولئیک روغن و عملکرد دانه بودند. برداشت و نمونه‌گیری برای اندازه‌گیری‌ها پس از رسیدن به مرحلهٔ رسیدگی فیزیولوژیک کنجد (کد رشدی ۷۹) انجام شد، که در هر دو سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰ در ۲۸ شهریور رخ داد. در این مرحله، پس از حذف اثرات حاشیه‌ای، چهار ردیف کاشت وسط هر کرت برداشت شد و پس از بوجاری، عملکرد دانه محاسبه گردید. محتوای کلروفیل‌های a و b و کاروتنوئیدها با روش آرنون (Arnon, 1949) و با استفاده از اسپکتروفتومتر (مدل UV3100- شرکت شیمادزو ژاپن) اندازه‌گیری شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز با کاهش جذب پراکسید هیدروژن در طول موج ۲۴۰ نانومتر (Aebi, 1984)، آسکوربات‌پراکسیداز با کاهش جذب آسکوربات در طول موج ۲۹۰ نانومتر (Nakano and Asada, 1981)، و گایاکول‌پراکسیداز با افزایش جذب گایاکول در طول موج ۴۷۰ نانومتر (Velikova *et al.*, 2000) سنجیده شد. برای فرایند جذب از اسپکتروفتومتر (مدل UV3100- شرکت شیمادزو ژاپن) استفاده شدند. فعالیت آنزیم‌ها بر حسب میلی‌گرم واحد آنزیمی به ازای هر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه بیان شد. محتوای پرولین برگ با روش بیتس و همکاران (Bates *et al.*, 1973) تعیین شد. برای اندازه‌گیری محتوای سیلیس، ابتدا برگ‌های بالغ با اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال و آب مقطر شسته و به مدت سه روز در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس، ۰/۱ گرم از بافت خشک با پنج میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم یک مولار مخلوط و به مدت ۳۰ دقیقه در اتوکلاو قرار گرفت. پس از خنک شدن، دو میلی‌لیتر آب اکسیژنه اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه در اتوکلاو قرار داده شد. در ادامه، ۴۳ میلی‌لیتر آب مقطر، ۰/۲۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و نیم میلی‌لیتر مولیبدات آمونیوم اضافه و به مدت سه دقیقه روی شیکر قرار گرفت. در نهایت، جذب نمونه‌ها پس از افزودن ۰/۷ میلی‌لیتر بیوسولفات سدیم با اسپکتروفتومتر (مدل UV3100- شرکت شیمادزو ژاپن) در طول موج ۶۵۰ نانومتر اندازه‌گیری و محتوای سیلیس بر اساس منحنی استاندارد سیلیس و بر حسب درصد محاسبه شد (Elliott and Snyder, 1991). اندازه‌گیری درصد اسیدهای چرب اولئیک و لینولئیک با استفاده از کروماتوگرافی گازی انجام شد. ابتدا نیم گرم روغن دانه کنجد با دو میلی‌لیتر محلول پتاس متانولی دو مولار و هفت میلی‌لیتر هگزان مخلوط شد. بعد نمونه ۱۵ دقیقه در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. دو میلی‌لیتر از فاز بالایی جدا و به ظرف حاوی ۰/۲ گرم سولفات سدیم منتقل شد. نمونه از کاغذ صافی عبور داده شد و یک میکرولیتر آن به دستگاه کروماتوگرافی گازی (مدل Varian CP-3800) با آشکارساز یونیزاسیون شعله و ستون CPsill-88 تزریق شد. گاز هلیم با فشار پنج بار و جریان ۱/۳ میلی‌لیتر در دقیقه به‌عنوان گاز حامل استفاده شد. دمای تزریق ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بود و نوع و میزان اسیدهای چرب با مقایسه زمان بازداری نمونه‌ها با استانداردها تعیین شد (AOCS, 1993).

تجزیه واریانس مرکب داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SAS نسخه ۹/۲ و MSTAT-C انجام شد. اثر سال تصادفی و اثر رژیم رطوبتی، سیلیس و سیتوکینین ثابت در نظر گرفته شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که محتوای کلروفیل a و کاروتنوئیدها در سطح احتمال یک درصد و محتوای کلروفیل b در سطح احتمال پنج درصد تحت اثر ساده سال قرار گرفتند. همچنین محتوای کلروفیل‌های a و b تحت اثر ساده تیمار کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد تغیر معنی‌دار داشتند. اثرات ساده سیلیس و سیتوکینین بر محتوای کلروفیل b و برهم‌کنش آن‌ها بر محتوای کلروفیل a و کاروتنوئیدها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳). نتایج مقایسات میانگین اثرات ساده نشان داد که محتوای کلروفیل‌های a، b و کارتنوئیدها در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰ به ترتیب ۱۰/۰۵، ۵/۵۷ و ۵/۸۰ درصد بیشتر از سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ بودند (جدول ۴). حداقل محتوای کلروفیل‌های a و b به ترتیب با ۱/۷۶ و ۰/۶۹۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در سطح شدید کم‌آبی مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۱۳/۱ و ۱۰/۸ درصد کاهش یافتند. کاهش محتوی کلروفیل در شرایط کم‌آبی ممکن است ناشی از اکسیداسیون نوری رنگ‌دانه‌ها، تخریب غشای کلروپلاست، آسیب مستقیم به ساختار کلروپلاست توسط گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، و همچنین افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز باشد که تجزیه کلروفیل را تسریع می‌کند. در مجموع، این عوامل موجب کاهش کارایی فرایند فتوسنتز و کاهش رشد گیاه می‌شوند (Anjum *et al.*, 2011). نتایج این پژوهش با یافته‌های سایر محققین مطابقت داشت (Fang *et al.*, 2022). نتایج همچنین نشان داد که محتوای کلروفیل b با کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم و محلول‌پاشی نانوسیلیس به ترتیب ۱۳/۵ و ۱۵/۸ درصد در مقایسه با تیمار شاهد (۰/۶۶۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) افزایش داشت (جدول ۴). همچنین محتوای کلروفیل b با محلول‌پاشی کیتتین ۸/۳۶ درصد نسبت به تیمار شاهد (۰/۷۰۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) افزایش یافت. بر اساس مطالعات پیشین، سیلیس می‌تواند با کنترل سیستم انتقال الکترون بین فتوسیستم‌ها و جلوگیری از تجمع گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاه را افزایش داده و اثرات مضر تنش را بر رنگدانه‌های فتوسنتزی کاهش دهد (Bukhat *et al.*, 2020). همچنین به نظر می‌رسد، کیتتین با مهار فعالیت آنزیم کلروفیلاز و مشارکت در تشکیل پروتوکلروفیل، از تخریب کلروفیل جلوگیری کرده و محتوای آن را افزایش می‌دهد. این تأثیر توسط سایر پژوهشگران نیز تأیید شده است (Cortleven and Schmülling, 2015). یافته‌های مطالعهٔ حاضر با نتایج سایر پژوهش‌ها که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت سیلیس و سیتوکینین در افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی است (Maghsoudi *et al.*, 2016; Golchin *et al.*, 2022)، همخوانی داشت.

بر اساس نتایج مقایسات میانگین برهم‌کنش‌ها، بیش‌ترین محتوای کلروفیل a با محلول‌پاشی نانوسیلیس و کیتتین و کاربرد سیلیکات کلسیم و کیتتین (به ترتیب ۲/۱۸ و ۲/۱۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد. در حالی‌که بیش‌ترین محتوای کارتنوئیدها با ۰/۷۸۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر تنها با محلول‌پاشی نانوسیلیس و سیتوکنین حاصل شد (شکل‌های ۲ و ۳). نتایج همچنین نشان دادند که کاربرد هم‌زمان سیلیس و کیتتین احتمالاً از طریق ایجاد اثر هم‌افزایی، کارایی بیشتری برای افزایش محتوای کلروفیل a و کاروتنوئیدها در مقایسه با استفاده‌ی جداگانه‌ی هر کدام به همراه داشته است. علاوه بر این، مشاهده شد که نانوذرات سیلیس در تعامل با کیتتین تأثیر بیش‌تری در افزایش محتوای کاروتنوئیدها دارند. این امر می‌تواند به دلیل سطح ویژه‌ی بالاتر، انحلال‌پذیری بیش‌تر و واکنش‌پذیری بالای نانوذرات نسبت به سیلیس معمولی باشد (Ruffini and Cremonini, 2009).

جدول۳- تجزیه واریانس مرکب برای صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی کنجد تحت تأثیر کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Table 3. Combined analysis of variance for physiological and biochemical traits of sesame affected by water deficit, silica, and cytokinin during the 2020–2021 and 2021–2022 growing seasons

S.O.V	df	Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Carotenoid content	Catalase activity	Ascorbate peroxidase activity	Guaiacol peroxidase activity	Proline content	Silica content
Year (y)	1	1.09**	0.04*	0.04**	0.000003^{ns}	41.03**	3.02**	0.085**	182977^{ns}
Replication (y)	4	0.0006	0.0005	0.001	0.003	0.007	0.0001	0.020	64761
Water deficit (a)	2	0.66**	0.06**	0.002^{ns}	0.030**	1.54**	0.03**	0.041**	936837**
y × a	2	0.02^{ns}	0.000004^{ns}	0.0001^{ns}	0.108**	1.31**	0.02**	0.021**	5509^{ns}
Error	8	0.03	0.01	0.001	0.0005	0.01	0.0008	0.006	92709
Silica (b)	2	2.57**	0.15**	0.25**	0.175**	2.71**	0.03**	0.061**	3163883**
y × b	2	0.05^{ns}	0.0005^{ns}	0.001^{ns}	0.017**	2.11**	0.02**	0.016**	24028^{ns}
a × b	4	0.03^{ns}	0.0002^{ns}	0.0005^{ns}	0.024**	0.24**	0.01**	0.0004^{ns}	34893^{ns}
y × a × b	4	0.01^{ns}	0.0001^{ns}	0.00004^{ns}	0.030**	0.23**	0.01**	0.0052^{ns}	3196^{ns}
Cytokinin (c)	1	1.65**	0.11**	0.15**	0.115**	2.45**	0.01**	0.064**	602530**
y × c	1	0.00007^{ns}	0.0006^{ns}	0.0001^{ns}	0.037**	1.87**	0.004^{ns}	0.009*	62^{ns}
a × c	2	0.001^{ns}	0.000006^{ns}	0.0001^{ns}	0.015**	0.09*	0.0005^{ns}	0.001^{ns}	14218^{ns}
y × a × c	2	0.003^{ns}	0.000002^{ns}	0.000003^{ns}	0.006^{ns}	0.10*	0.0004^{ns}	0.0004^{ns}	1380^{ns}
b × c	2	0.14**	0.01^{ns}	0.01**	0.0005^{ns}	0.09*	0.006*	0.002^{ns}	1839^{ns}
y × b × c	2	0.007^{ns}	0.001^{ns}	0.0009^{ns}	0.0004^{ns}	0.10*	0.006**	0.001^{ns}	4996^{ns}
a × b × c	4	0.03^{ns}	0.0001^{ns}	0.001^{ns}	0.007*	0.06*	0.007**	0.001^{ns}	971^{ns}
y × a × b × c	4	0.01^{ns}	0.0001^{ns}	0.00008^{ns}	0.001^{ns}	0.07*	0.007**	0.0008^{ns}	7607^{ns}
Error	60	0.02	0.009	0.002	0.002	0.026	0.001	0.002	79813
CV (%)	-	8.86	13.46	7.14	19.25	15.76	19.22	11.93	22.79

ns، * و **: فاقد اختلاف آماری معنی‌دار، به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد.

ns, **, *: respectively, non-significant and significant at 1% and 5% probability levels.

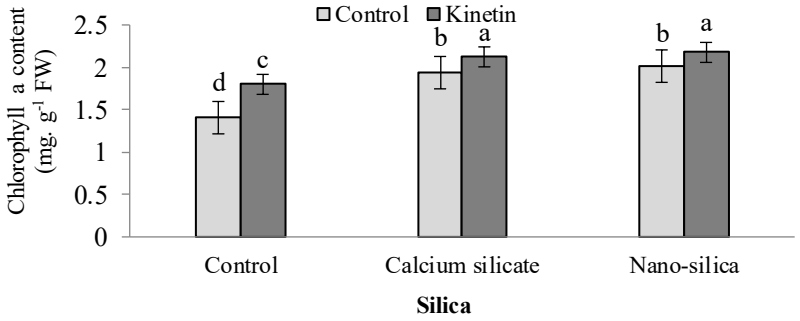
جدول۴- مقایسه میانگین محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در کنجد تحت اثرات اصلی کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در طول سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹و ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Table 4. Comparison of mean photosynthetic pigment concentrations in sesame under the main effects of water deficit, silica, and cytokinin during the 2020–2021 and 2021–2022 growing seasons

Treatments		Chlorophyll a content	Chlorophyll b content	Carotenoid content
			mg. g^{-1} FW	
Crop year	2020-2021	1.81b	0.718b	0.667b
	2021-2022	2.01a	0.760a	0.708a
LSD0.05		0.065	0.038	0.019
Water deficit	Control	2.03a	0.777a	-
	Moderate WD	1.94b	0.746a	-
	Severe WD	1.76c	0.693b	-
LSD0.05		0.080	0.047	-
Silica	Control	1.60b	0.663b	0.603c
	Calcium silicate	2.03a	0.766a	0.690b
	Nano-silica	2.10a	0.787a	0.770a
LSD0.05		0.080	0.047	0.023
Cytokinin	Control	1.79b	0.707b	0.650b
	Kinetin	2.03a	0.771a	0.726a
LSD0.05		0.065	0.038	0.019

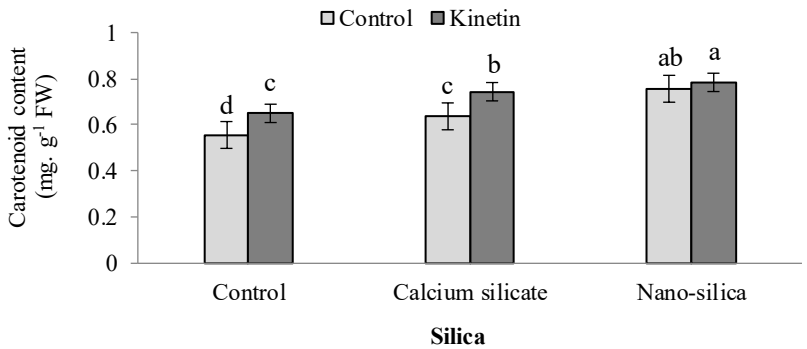
میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with at least one common letter in each column do not show significant differences based on the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. WD: water deficit



شکل۲- مقایسه میانگین محتوای کلروفیل a در کنجد تحت برهم‌کنش سیلیس× سیتوکینین. هر ستون نشان‌دهندۀ میانگین سه تکرار است و ستون‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 2. Mean comparison of chlorophyll a concentration in sesame under the silica × cytokinin interaction. Each bar represents the mean of three replicates, with error bars indicating the standard error.



شکل۳- مقایسه میانگین محتوای کاروتنوئید در کنجد تحت برهم‌کنش سیلیس×سیتوکینین. هرستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار است و ستون‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 3. Mean comparison of carotenoid concentration in sesame under the silica × cytokinin interaction. Each bar represents the mean of three replicates, with error bars indicating the standard error.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات‌پراکسیداز و گایاکول-پراکسیداز تحت برهم‌کنش سال × کم‌آبی × سیلیس در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین برهم‌کنش کم‌آبی × سیلیس × سیتوکینین بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات‌پراکسیداز در سطح احتمال پنج درصد و بر فعالیت آنزیم گایاکول‌پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد اثر معنی‌دار داشتند (جدول ۳). با توجه به نتایج مقایسات میانگین برهم‌کنش سال × کم‌آبی × سیلیس، حداکثر فعالیت آنزیم کاتالاز در سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ در سطح کم‌آبی شدید با محلول‌پاشی نانوسیلیس (۰/۴۵۲ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) و در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰ بدون کم‌آبی با همان محلول‌پاشی (۰/۴۵۰ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) به دست آمد. بیشترین فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز در سال زراعی ۱۴۰۰-۴۰۱ در تیمار کم‌آبی متوسط با تیمارهای کاربرد خاکی سیلیکات کلسیم و محلول‌پاشی نانوسیلیس (به ترتیب ۲/۵۷ و ۲/۴۷ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) به دست آمد. همچنین، فعالیت آنزیم گایاکول-پراکسیداز با ۰/۵۱۷ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین-های محلول در دقیقه در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰ در سطح کم‌آبی متوسط با محلول‌پاشی نانوسیلیس به حداکثر مقدار رسید (جدول ۵). تنش موجب بسته شدن روزنه‌ها و کاهش دی‌اکسید کربن در سلول‌های مزوفیل برگ می‌شود و تجمع NADPH در کلروپلاست را در پی دارد. در این شرایط، کمبود $NADP^+$ باعث می‌شود اکسیژن به‌عنوان گیرنده الکترون عمل کرده و رادیکال سوپراکسید و گونه‌های اکسیژن واکنش‌گر ایجاد شود که در نهایت تنش اکسیداتیو را به همراه دارد (Jaleel *et al.*, 2009). گیاهان برای مقابله با این اکسیدان‌ها از سازوکارهای حفاظتی شامل مولکول‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بهره می‌گیرند (Parida and Das, 2005). این ترکیبات نقش مهمی در کاهش آسیب‌های ناشی از تنش خشکی و اکسیداتیو ایفا می‌کنند (Baroniya *et al.*, 2012). سیلیس با تحریک فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند آسکوربات‌پراکسیداز، پراکسیداز، سوپراکسیددیسموتاز و کاتالاز تحمل گیاهان را در برابر تنش خشکی تقویت می‌کند (Bukhari *et al.*, 2021). نتایج مطالعه‌ای نشان داد که تنش خشکی و کاربرد سیلیس می‌توانند باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شود (Mahmoodi *et al.*, 2020).

نتایج مقایسات میانگین برهم‌کنش کم‌آبی × سیلیس × سیتوکینین نشان داد که بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز با ۰/۴۱۹ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه، در سطح کم‌آبی شدید با محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین حاصل شد. حداکثر فعالیت آنزیم آسکوربات-پراکسیداز نیز در سطح کم‌آبی متوسط با کاربرد خاکی سیلیکات پتاسیم و محلول‌پاشی کینتین (۱/۶۳ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) به دست آمد. همچنین، فعالیت آنزیم گایاکول‌پراکسیداز در همان سطح کم‌آبی با محلول‌پاشی نانوسیلیس و کینتین (۰/۲۸۷ میلی‌گرم واحد آنزیمی بر گرم پروتئین‌های محلول در دقیقه) به‌حداکثر مقدار رسید (جدول ۶). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که محلول‌پاشی کینتین در سطوح مختلف تیمارهای کم‌آبی و سیلیس، به‌طور مؤثری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات-پراکسیداز و گایاکول‌پراکسیداز را افزایش داد. سایر پژوهشگران تأیید کردند که در سطح شدید تنش خشکی، کاربرد سیتوکینین افزایش چشمگیری در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات‌پراکسیداز ایجاد کرده است (Hossini *et al.*, 2024).

محتوای پرولین

نتایج تجزیه واریانس اعداد حاصل از اجرای آزمایش نشان داد که محتوای پرولین تحت برهم‌کنش‌های سال × کم‌آبی و سال × سیلیس در سطح احتمال یک درصد و تحت برهم‌کنش سال × سیتوکینین در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری نشان داد (جدول ۳).

جدول۵- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی در کنجد تحت برهم‌کنش سال زراعی، کم‌آبی و سیلیس

Table 5. Comparison of mean antioxidant enzyme activities in sesame under the interactive effects of growing seasons, water deficit, and silica

Crop year	Water deficit	Silica	Catalase activity	Ascorbate peroxidase activity	Guaiacol peroxidase activity
			mg EU g^{-1} SP min^{-1}		
2020-2021	Control	Control	0.207g-j	0.351g	0.009h
		Calcium silicate	0.173ij	0.380g	0.015h
		Nano-silica	0.172ij	0.396g	0.020h
	Moderate WD	Control	0195h-j	0.370g	0.018h
		Calcium silicate	0.278d-f	0.414g	0.019h
		Nano-silica	0.317cd	0.446g	0.029h
	Severe WD	Control	0.220g-i	0.389g	0.022h
		Calcium silicate	0.383b	0.449g	0.028h
		Nano-silica	0.452a	0.469g	0.034h
2021-2022	Control	Control	0.237f-h	0.814f	0.259g
		Calcium silicate	0.189h-j	1.54cd	0.327de
		Nano-silica	0.450a	1.41d	0.377c
	Moderate WD	Control	0.163j	1.10e	0.297ef
		Calcium silicate	0.297c-e	2.57a	0.453b
		Nano-silica	0.343bc	2.47a	0.517a
	Severe WD	Control	0.174ij	1.22e	0.367c
		Calcium silicate	0.250e-g	1.71c	0.262fg
		Nano-silica	0.298c-e	1.94b	0.345cd
LSD0.05			0.052	0.186	0.037

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with at least one common letter in each column do not show significant differences based on the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. WD: water deficit

جدول ۶- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی در کنجد تحت برهم‌کنش کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین

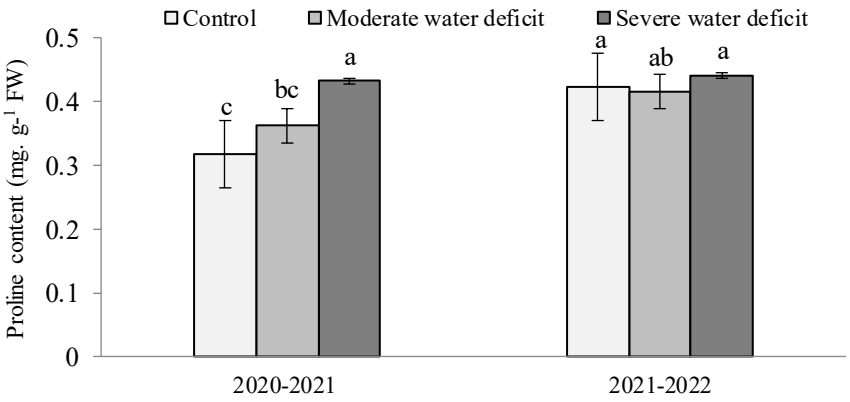
Table 6. Mean comparison for antioxidant enzyme activities in sesame under the interactive effects of water deficit, silica, and cytokinin

Water deficit	Silica	Cytokinin	Catalase activity	Ascorbate peroxidase activity	Guaiacol peroxidase activity
			mg EU g^{-1} SP min^{-1}		
Control	Control	Control	0.229f	0.387i	0.118fg
		Kinetin	0.215f	0.778f-h	0.150ef
	Calcium silicate	Control	0.156gh	0.714gh	0.170e
		Kinetin	0.206fg	1.20cd	0.172e
	Nano-silica	Control	0.297c-e	0.730gh	0.180e
		Kinetin	0.325b-d	1.07de	0.217cd
Moderate WD	Control	Control	0.152h	0.655h	0.154e
		Kinetin	0.206fg	0.814f-h	0.161e
	Calcium silicate	Control	0.253ef	1.36bc	0.238bc
		Kinetin	0.322cd	1.63a	0.235bc
	Nano-silica	Control	0.284de	1.37bc	0.259ab
		Kinetin	0.376ab	1.54ab	0.287a
Severe WD	Control	Control	0.111h	0.802f-h	0.230bc
		Kinetin	0.283de	0.804f-h	0.160e
	Calcium silicate	Control	0.291c-e	0.890e-g	0.104g
		Kinetin	0.342bc	1.27c	0.186de
	Nano-silica	Control	0.331b-d	0.950ef	0.160e
		Kinetin	0.419a	1.46ab	0.220cd
LSD0.05			0.052	0.186	0.037

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

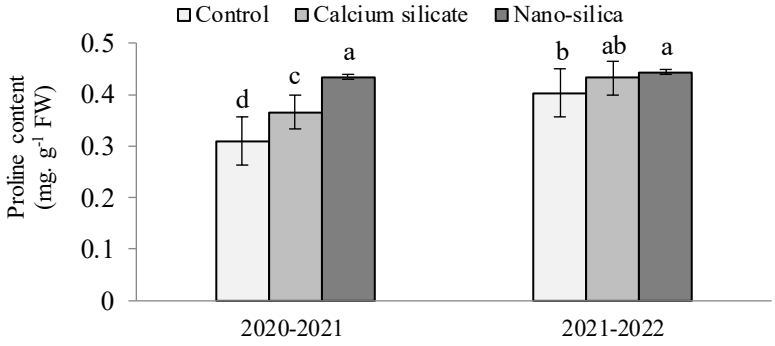
Means with at least one common letter in each column do not show significant differences based on the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. WD: water deficit

بیش‌ترین محتوای پرولین در سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ در سطح شدید کم‌آبی (۰/۴۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰ در شرایط بدون کم‌آبی و سطح شدید کم‌آبی (به ترتیب ۰/۴۲۳ و ۰/۴۴۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد (شکل ۴). از مهم‌ترین دلایل افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش اسمزی، می‌توان به تجزیه پروتئین‌ها و افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز پرولین اشاره کرد. این موضوع در گزارشات سایر محققان نیز مورد تأیید قرار گرفته است (Hoseini *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد که گیاه در شرایط تنش، با افزایش میزان پرولین در سلول‌های خود، غلظت داخلی را بالا می‌برد تا توانایی جذب و نگهداری آب درون سلول‌ها را حفظ کند (Karmollachaab *et al.*, 2013). حداکثر محتوای پرولین در هر دو سال زراعی (۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰) با محلول‌پاشی نانوسیلیس (به ترتیب با ۰/۴۳۴ و ۰/۴۴۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد (شکل ۵). نتایج مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که استفاده از سیلیس تأثیر چشمگیری در افزایش محتوای پرولین دارد. این عنصر با بهبود جذب آب و تقویت آماس سلولی، تجمع پرولین را تحریک کرده و در نتیجه تحمل گیاهان را در برابر تنش خشکی ارتقا می‌بخشد (Amin *et al.*, 2018). بااین‌وجود، نانوذرات، به‌دلیل ابعاد کوچک‌تر، از قابلیت انتقال و انتشار بهتری برخوردارند. علاوه بر این، سطح ویژه بالاتر آن‌ها منجر به انحلال‌پذیری و واکنش‌پذیری بیش‌تر می‌شود، که این ویژگی‌ها در یافته‌های سایر پژوهشگران نیز تأیید شده است (Ruffini and Cremonini, 2009). حداکثر محتوای پرولین در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱، با محلول‌پاشی کینتین، به مقدار ۰/۴۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر رسید (شکل ۶). مطابق با گزارش‌ها، سیتوکینین احتمالاً با فعال‌سازی ژن‌های مرتبط با سنتز پرولین، کاهش تجزیه پرولین، و تقویت تحمل سلولی به تنش، باعث افزایش محتوای پرولین می‌شود (Hare and Cress, 1997).



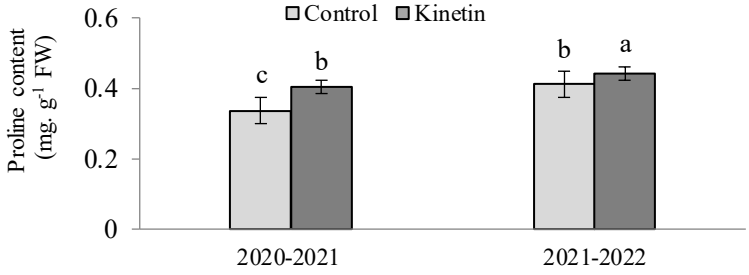
شکل۴- مقایسه میانگین محتوای پرولین در کنجد تحت برهم‌کنش سال×کم آبی. هرستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار است و ستون‌های خطا نشان دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 4. Mean comparison of proline content in sesame under the year × water deficit interaction. Each bar represents the mean of three replicates, with error bars indicating the standard error.



شکل ۵- مقایسه میانگین محتوای پرولین در کنجد تحت برهم‌کنش سال×سیلیس هر ستون نشان‌دهنده میانگین سه تکرار می باشد و ستون‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 5. Mean comparison of proline content in sesame under the year × silica interaction. Each bar represents the mean of three replicates, with error bars indicating the standard error.



شکل ۶- مقایسه میانگین محتوای پرولین در کنجد تحت برهم‌کنش سال×سیتوکینین. هرستون نشان‌دهندهٔ میانگین سه تکرار است و ستون‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 6. Mean comparison of proline content in sesame under the year × cytokinin interaction. Each bar represents the mean of three replicates, with error bars indicating the standard error.

غلظت سیلیس

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که غلظت سیلیس تحت اثرات ساده کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). نتایج مقایسات میانگین اثرات ساده نشان داد که کم‌ترین غلظت سیلیس با ۱۰۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح شدید کم‌آبی مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۲۳ درصد کاهش یافت (جدول ۷). کاهش فعالیت ریشه، تغیر ساختار و فشردگی خاک، و کاهش تعرق می‌توانند دلایل جذب کم‌تر سیلیس در شرایط کم‌آبی باشند (Hajipour *et al.,* 2019). نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که استفاده از سیلیس اثر مثبتی بر غلظت سیلیس گیاه داشت. با این‌حال بیش‌ترین غلظت سیلیس، معادل ۱۴۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با محلول‌پاشی نانوسیلیس به دست آمد که در مقایسه با تیمار شاهد، ۳۸/۶ درصد افزایش را نشان داد (جدول ۷). اعتقاد بر این است که کاربرد کودهای نانو زمان و سرعت آزادسازی عناصر غذایی را با نیازهای گیاه هماهنگ می‌کند. این ویژگی در نهایت به کاهش آبشویی عناصر منجر شده و امکان جذب حداکثری مواد مغذی را برای گیاه فراهم می‌سازد (Naderi and Danesh-Shahraki, 2013). محلول‌پاشی کیتین موجب افزایش ۱۱/۳ درصدی غلظت سیلیس در مقایسه با تیمار شاهد (۱۱۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) شد (جدول ۷) که به نقش سیتوکینین در افزایش جذب عناصر غذایی، تنظیم جهت دهی و انتقال هدفمند عناصر غذایی نسبت داده می‌شود (Nabizadeh, 2023; Khajavi *et al.,* 2024).

اسید اولئیک و لینولئیک

نتایج تجزیه واریانس اعداد حاصل از اجرای آزمایش نشان داد که اسید اولئیک از نظر آماری فقط تحت اثر ساده تیمار کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت. اسید لینولئیک نیز از نظر آماری تحت اثر هیچ یک از تیماهای

آزمایشی قرار نگرفت (جدول ۸). حداکثر محتوای اسید اولئیک، در سطح شدید کم‌آبی (۴۳/۳ درصد)، با اختلاف ۱/۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۹). محققان گزارش کردند که اسید لینولئیک تحت شرایط تنش خشکی تغیر معنی‌دار نداشته است (Zali *et al.,* 2020). در مقابل، افزایش قابل‌توجه اسید اولئیک در همین شرایط مشاهده و تأیید گردید (Bellaloui *et al.,* 2009; Zali *et al.,* 2020).

جدول۷- مقایسه میانگین محتوای سیلیس در کنجد تحت اثرات اصلی کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در طول سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Table 7. Mean comparison for silica content in sesame under the main effects of water deficit, silica, and cytokinin during the 2020–2021 and 2021–2022 growing season

Treatments		Silica content mg. kg^{-1}
Crop year	2020-2021	-
	2021-2022	-
LSD0.05		-
Water deficit	Control	1382a
	Moderate WD	1271a
	Severe WD	1064b
LSD0.05		133.2
Silica	Control	908c
	Calcium silicate	1331b
	Nano-silica	1479a
LSD0.05		133.2
Cytokinin	Control	1165b
	Kinetin	1314a
LSD0.05		108.76

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with at least one common letter in each column do not show significant differences based on the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. WD: water deficit

جدول ۸- تجزیه واریانس مرکب برای اسیدهای چرب غیراشباع و عملکرد دانه در کنجد تحت تأثیر کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در طول سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Table 8. Combined analysis of variance for unsaturated fatty acids and seed yield in sesame affected by water deficit, silica, and cytokinin during the 2020–2021 and 2021–2022 growing season

S.O.V	df	Oleic acid	Linoleic acid	Seed yield
Year (y)	1	3.17^{ns}	0.001^{ns}	949218**
Replication (y)	4	1.54	4.27	9737
Water deficit (a)	2	16.08**	2.62^{ns}	3126611**
y × a	2	1.76^{ns}	0.001^{ns}	15677^{ns}
Error	8	0.62	1.86	56899
Silica (b)	2	0.48^{ns}	3.37^{ns}	846694**
y × b	2	0.05^{ns}	4.80^{ns}	1713^{ns}
a × b	4	0.04^{ns}	0.49^{ns}	13087^{ns}
y × a × b	4	0.004^{ns}	0.06^{ns}	6198^{ns}
Cytokinin (c)	1	5.55^{ns}	0.14^{ns}	286752**
y × c	1	0.002^{ns}	0.01^{ns}	555^{ns}
a × c	2	0.12^{ns}	0.05^{ns}	6275^{ns}
y × a × c	2	0.36^{ns}	0.53^{ns}	1557^{ns}
b × c	2	0.12^{ns}	3.55^{ns}	17067^{ns}
y × b × c	2	0.03^{ns}	0.34^{ns}	2857^{ns}
a × b × c	4	0.01^{ns}	0.12^{ns}	4645^{ns}
y × a × b × c	4	0.02^{ns}	0.02^{ns}	4823^{ns}
Error	60	2.29	2.03	17725
CV (%)	-	3.55	3.31	8.84

ns، * و **: فاقد اختلاف آماری معنی‌دار، به ترتیب معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد.

ns, **, *: respectively, non-significant and significant at 1% and 5% probability levels.

جدول ۹- مقایسه میانگین اولئیک اسید و عملکرد دانه در کنجد تحت اثرات اصلی کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در طول سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰

Table 9. Comparison of mean oleic acid and seed yield in sesame under the main effects of water deficit, silica, and cytokinin during the 2020–2021 and 2021–2022 growing season

Treatments		Oleic acid	Seed yield
		%	kg. ha^{-1}
Crop year	2020-2021	-	1412b
	2021-2022	-	1599a
LSD0.05		-	51.3
Water deficit	Control	42.0b	1751a
	Moderate WD	42.4b	1588b
	Severe WD	43.3a	1179c
LSD0.05		0.714	62.8
Silica	Control	-	1342c
	Calcium silicate	-	1528b
	Nano-silica	-	1647a
LSD0.05		-	62.8
Cytokinin	Control	-	1454b
	Kinetin	-	1557a
LSD0.05		-	51.3

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون، بر اساس آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد، اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means with at least one common letter in each column do not show significant differences based on the least significant difference (LSD) test at the 5% probability level. WD: water deficit

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که عملکرد دانه تحت اثرات ساده سال، کم‌آبی، سیلیس و سیتوکینین در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌دار نشان داد اما تحت تأثیر هیچ یک از برهم‌کنش‌ها قرار نگرفت (جدول ۸). نتایج مقایسات میانگین اثرات ساده نشان می‌دهد که در سال زراعی ۴۰۱-۱۴۰۰، عملکرد دانه ۱۱/۷ درصد بیش‌تر از سال زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ (۱۴۱۲ کیلوگرم در هکتار) بود (جدول ۹). کمترین عملکرد دانه با ۱۱۷۹ کیلوگرم در هکتار در سطح شدید کم‌آبی مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۳۲/۷ درصد کاهش یافت. نتایج این مطالعه نشان داد که با آغاز اعمال تیمار کم‌آبی، محتوای کلروفیل‌های a و b و محتوای سیلیس برگ کاهش یافتند که منجر به کاهش احتمالی فتوسنتز و در نهایت کاهش عملکرد دانه شد. تحقیقات پیشین نیز کاهش عملکرد دانهٔ کنجد تحت تنش خشکی را تأیید کرده‌اند (Pourghasemian *et al.*, 2020; Attar Roshan *et al.*, 2024). علاوه بر این، برخی پژوهشگران این کاهش را به کاهش فتوسنتز و کاهش تولید و عرضه مواد فتوسنتزی مرتبط دانسته‌اند (Seify *et al.*, 2023). نتایج ما همچنین نشان داد که کاربرد سیلیس اثر مثبتی بر عملکرد دانه داشته است. بیش‌ترین عملکرد دانه با محلول‌پاشی نانوسیلیس، به میزان ۱۶۴۷ کیلوگرم در هکتار، حاصل شد که در مقایسه با تیمار شاهد، افزایش ۱۸/۵ درصدی نشان داد (جدول ۹). یافته‌های این تحقیق همچنین نشان داد که استفاده از سیلیس محتوای کلروفیل b و محتوای سیلیس برگ را افزایش داد. این امر احتمالاً با بهبود فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی، سبب افزایش عملکرد دانه شد. اثر مثبت سیلیس ناشی از تجمع آن در برگ‌ها است که باعث افزایش استحکام و محتوای کلروفیل در واحد سطح برگ می‌شود و توانایی گیاه را برای بهره‌گیری بهینه از نور تقویت می‌کند (Nabati *et al.*, 2013). علاوه بر این، سیلیس با بهبود ساختار کلروپلاست (Liang *et al.*, 2007) و ارتقای کارایی فتوسیستم II (AL-Aghabary *et al.*, 2004) به فتوسنتز کمک کرده و در نهایت می‌تواند موجب افزایش عملکرد گیاه شود. افزون بر این، نانوکودها با آزادسازی تدریجی و کنترل‌شده عناصر

مغذی، راندمان مصرف کودها را بهبود بخشیده و عناصر غذایی را به‌صورت بهینه در اختیار گیاه قرار می‌دهند (Lai, 2007). با محلول‌پاشی کینتین، عملکرد دانه به میزان ۶/۶۲ درصد بیش‌تر از شاهد (۱۴۵۴ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (جدول ۹). بر اساس نتایج این پژوهش، کینتین اثر مشابهی با سیلیس داشت؛ به‌گونه‌ای که با افزایش محتوای کلروفیل b و محتوای سیلیس برگ، احتمالاً موجب بهبود فتوسنتز شده و در نهایت افزایش عملکرد دانه را به دنبال داشت. سایر پژوهش‌ها اثبات کرده‌اند که سیتوکینین با تحریک تقسیم سلولی، بیوسنتز و تجمع کلروفیل، افزایش فتوسنتز و تأخیر در پیری برگ‌ها، نقش مهمی در رشد و عملکرد گیاهان ایفا می‌کند (Taiz and Zeiger, 2006; Gujjar *et al.*, 2020). طبق گزارشی، کاربرد کینتین تحت تنش شدید گرمایی عملکرد دانه آفتابگردان را بهبود بخشید؛ این اثر به بهبود اجزای عملکرد و انتقال مؤثر آسیمیلات‌ها از برگ‌ها به اندام‌های زایشی نسبت داده شده است (Khajavi *et al.*, 2024).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه، بیش‌ترین میزان اسید اولئیک در سطح شدید کم‌آبی مشاهده شد. در مقابل، محتوای کلروفیل‌های a و b، غلظت سیلیس برگ و عملکرد دانه در همان سطح از کم‌آبی کاهش قابل‌توجهی نسبت به تیمار شاهد نشان دادند. عملکرد دانه به لحاظ آماری تحت تأثیر برهم‌کنش تنش خشکی با سیلیس و سیتوکینین قرار نگرفت. با این حال، استفاده از سیلیس، به‌ویژه به شکل محلول‌پاشی نانوسیلیس و همچنین کاربرد کینتین، محتوای کلروفیل b، محتوای سیلیس برگ و عملکرد دانه را به طور معنی‌دار در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. علاوه بر این، فعالیت آنزیم‌های گایاکول-پراکسیداز و کاتالاز به ترتیب در سطوح متوسط و شدید کم‌آبی، با محلول‌پاشی هم‌زمان نانوسیلیس و کینتین، به بالاترین مقادیر خود رسیدند. در نهایت، طی سال‌های زراعی ۴۰۰-۱۳۹۹ و ۴۰۱-۱۴۰۰، محلول‌پاشی نانوسیلیس بالاترین میزان محتوای پرولین را به همراه داشت. در مجموع، استفاده از نانوسیلیس و کینتین نه‌تنها برای افزایش عملکرد دانه توصیه می‌شود، بلکه کاربرد هم‌زمان آن‌ها می‌تواند به ارتقای فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش کم‌آبی و احتمالاً بهبود تحمل به خشکی گیاه کنجد کمک کند.

سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه دکتری نویسنده اول می‌باشد. بدینوسیله از زحمات و تلاش‌های بی‌وقفه عوامل ایستگاه تحقیقات کشاورزی فیروزکنده شهر ساری به‌دلیل تأمین زمین و ادوات اجرای طرح قدردانی به‌عمل می‌آید.

References

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. *Methods in Enzymology,* 105, 121–126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3

AL-Aghabary, K., Zhujun, Z., & Qinhua, S. (2004). Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 27(12), 2101-2115. https://doi.org/10.1081/PLN-200034641

Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., & Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10, 177–183. https://doi.org/10.1007/s12633-015-9372-x

Anjum, S. A., Wang, L. C., Farooq, M., Hussain, M., Xue, L. L., & Zou, C. M. (2011). Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(3), 177-185. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00459.x

AOCS. (1993). Official methods and recommended practices. *The American Oil Chemists Society Champaign*. (Book)

Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta Vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1–15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1

Attar Roshan, M., Rahnama, A., Meskarbashee, M., Siahpoosh, M. R., & Harrison, M. T. (2024). Effect of sowing date and irrigation intervals on morphological traits and seed yield of new indehiscent sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 26(2), 148-169. http://agrobreedjournal.ir/article-1-1354-en.html [In Persian].

Attibayeba., Elie, N. M., Serina, N. J., Dianga, J. G. C., & Francois, M. Y. (2010). Description of different growth stages of *Sesamum indicum* L. using the extended BBCH Scale. *Pakistan Journal of Nutrition*, 9(3), 235-239. https://doi.org/10.3923/pjn.2010.235.239

Baroniya, S. S., Kataria, S., Pandey, G. P., & Guruprasad, K. N. (2012). Intraspecific variations in antioxidant defense responses and sensitivity of soybean varieties to ambient UV radiation. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35(5), 1521-1530. https://doi.org/10.1007/s11738-012-1193-6

Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Bellaloui, N., Smith, J. R., Ray, J. D., & Gillen, A. M. (2009). Effect of maturity on seed composition in the early soybean production system as measured on near-isogenic soybean lines. *Crop Science*, 49, 608-620. https://doi.org/10.2135/cropsci2008.04.0192

Bukhari, M. A., Sharif, M. S., Ahmad, Z., Barutçular, C., Afzal, M., Hossain, A. & EL Sabagh, A. (2021). Silicon mitigates the adverse effect of drought in canola (*Brassica napus* IL.) through promoting the physiological and antioxidants activity. *Silicon*, 13, 3817–3826. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00685-x

Bukhat, S., Manzoor, H., Athar, H. U.R., Zafar, Z.U., Azeem, F. & Rasoul, S. (2020). Salicylic acid induced photosynthetic adaptability of *Raphanus sativus* to salt stress is associated with antioxidant capacity. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 809-822. https://doi.org/10.1007/s00344-019-10024-z

Christian, M. M., Shimelis, H., Laing, M. D., Tsilo, T. J., & Mathew, I. (2022). Breeding for silicon-use efficiency, protein content and drought tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.): a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil & Plant Science*, 72(1), 17-29. https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1984564

Cortleven, A., & Schmülling, T. (2015). Regulation of chloroplast development and function by cytokinin. *Journal of Experimental Botany*, 66(16), 4999-5013.

Elliott, C. L., & Snyder, G. H. (1991). Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(6), 1118-1119. https://doi.org/10.1093/jxb/erv132

Fang, S., Yang, H., Wei, G., Shen, T., Wan, Z., Wang, M., Wang, X., & Wu, Z. (2022). Potassium application enhances drought tolerance in sesame by mitigating oxidative damage and regulating osmotic adjustment. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1096606. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1096606

Ghasemipamah, M., Aminian, R., Gholamhoseini, M., & Habibzadeh, F. (2020). Sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars response to full and low irrigation regimes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(3), 151-163. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.250447.654439 [In Persian].

Gholipur Noveyri, S., Zamani, G. R., & Jami Al-Ahmadi, M. (2022). The effect of putrescine and calcium nitrate on physiological properties and sesame (*Sesamum indicum* L.) yield under moisture stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 15(2), 335–346. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3833.1922 [In Persian].

Golchin, L., Tavakoli, A., & Mohsenifard, E. (2022). Effect of cytokinin application on photosynthesis, gas exchange and seed yield of safflower (*Carthamus tinctorius*) under drought stress condition. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(1), 149-160. https://ijfcs.ut.ac.ir/article_87169_3bef6e1892fa2fa883719e27619a668c.pdf [In Persian].

Gujjar, R. S., Banyen, P., Chuekong, W., Worakan, P., Roytrakul, S., & Supaibulwatana, K. (2020). A synthetic cytokinin improves photosynthesis in rice under drought stress by modulating the abundance of proteins related to stomatal conductance, chlorophyll contents, and rubisco activity. *Plants*, 27(9), 106-120. https://doi.org/10.3390/plants9091106

Haghanian, S., Yadavi, A., Blouchi, H., Moradi, A., & Behzadi, Y. (2019). The effect of nitrogen on yield and yield components of different sesame (*Sesamum Indicum* L.) varieties under weed competition. *Plant Productions*, 42(2), 195-210. https://doi.org/10.22055/ppd.2019.22805.1497 [In Persian].

Hajipour H., Jabbarzadeh, Z., & Rasouli Sadaghiani, M. H. (2019). Effect of foliar application of silica on some growth, biochemical and reproductive characteristics and leaf elements of chrysanthemum (*Dendranthema×Grandiflorum* cv. Fellbacher Wein). *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 10(1), 29-46. [In Persian].

Hare, P. D., & Cress, W. A. (1997). Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21(2), 79–102. https://doi.org/10.1023/A:1005703923347

Honig, M., Plihalova, L., Husickova, A., Nisler, J., & Doležal, K. (2018). Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 19, 4045. https://doi.org/10.3390/ijms19124045

Hoseini, Z., Barzegar, T., Ghahremani, Z., & Nikbakht, J. (2020). Physiological responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Sanry) to foliar spray of salicylic acid and biostimulant megafol under deficit irrigation stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), 845-855. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2253.1574 [In Persian].

Hossini, F., Meskarbashee, M., & Rahnama, A. (2024). The effect of foliar application of cytokinin and salicylic acid on yield and physiological characteristics of sunflower under drought stress conditions. *Journal of Plant Production Research,* 32(3), 97-115. https://doi.org/10.22069/jopp.2024.22633.3163 [In Persian].

Jaleel, C. A., Riadh, K., Gopi, R., Manivannan, P., Ines, J., Al-Juburi, H. J., Chang-Xing, Z., Hong-Bo, S., & Panneerselvam, R. (2009). Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constrains. *Acta Physiologia Plantarum*, 31, 427-436. https://doi.org/10.1007/s11738-009-0275-6

Karmollachaab, A., Gharineg, M. H., Bakhshandeh, A., Moradi Telvat, M. R., & Fathi, G. A. (2013). Effect of silicon application on physiological characteristics and growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress condition. *Agroecology*, 5(4), 430-442. https://doi.org/10.22067/jag.v5i4.33000 [In Persian].

Khajavi, M., Rahnama, A., Meskarbashi, M., Moosavi., S. A., & Harrison, M. T. (2024). Foliar application of cytokinin hormone on morphophysiological and yield traits of sunflower cultivars in late sowing date. *Applied Field Crops Research*, 36(1), 21-41. https://doi.org/10.22092/aj.2024.362391.1648 [In Persian].

Lai, R. (2007). Soil science in the era of hydrogen economy and 10 billion people. The Ohio State University, USA. pp, 1-9. https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0001

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422-428. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008

Maghsoudi, K., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2016). Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 39(7), 1001-1015. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109108

Mahmoodi, K., Alizadeh, Y., Abdul-Hamid, H., & Naji, H. R. (2020). Effect of nano Sio_2 on physiological features of pistacia atlantica subsp. mutica under drought stress. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 26(4), 85-100. https://doi.org/10.22069/jwfst.2020.13986.1715 [In Persian].

Mahrokh, A., Nabipour, M., Roshanfekr, H. A., & Choukan, R. (2019). Response of some grain maize physiological parameters to drought stress and application of auxin and cytokinin hormones. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 1-15. https://doi.org/10.22077/escs.2018.1116.1229 [In Persian].

Mehmood, M., P´erez-Llorca, M., Casadesús, A., Farrakh, S., & Munn´e-Bosch, S. (2021). Leaf size modulation by cytokinins in sesame plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 763–770. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.09.013

Misagh, M., Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A. R., & Khadem Hamze, H. R. (2016). Improvement of yield, oil and protein percentage of sesame (*Sesamum indicum* L.) under drought stress by foliar application of zinc and boron. *Crop Production*, 9(1), 163-180. https://doi.org/10.22069/ejcp.2016.2962 [In Persian].

Momeni, S., Fahmideh, L., Emamjomeh, A., Solouki, M., & Zahiri, J. (2020). Effect of drought stress on morphological and physiological traits of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 15(60), 61–78. [In Persian].

Nabati, J., Kafi, M., Masoumi, A., & Mehrjerdi, M. (2013). Effect of salinity and silicon application on photosynthetic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *International Journal of Agricultural Sciences*, 3(4), 483-492.

Nabizadeh, E. (2023). Effect of nitrogen fertilizer, inoculation with mycort fungus and foliar spraying of cytokinin on yield and yields component of wheat sardari cultivar under rainfed conditions. *Iranian Journal of Seed Science and Research*, 10(3), 65-79. https://jms.guilan.ac.ir/article_7675.html [In Persian].

Naderi, M. R., & Danesh-Shahraki, A. (2013) Nanofertilizers and their roles in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5, 2229-2232. https://doi.org/10.47815/apsr.2021.10067

Nakano, Y. & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22(5), 867-880. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232

Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324-349. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010

Pezeshk, S., Malakouti, M. J., Tehrani, M. M., & Rezakhani, L. (2023). Investigation of the effect of silicon on wheat yield and water use efficiency under water stress conditions. *Iranian Journal of Soil Research*, 36(4), 335-347. [In Persian].

Pourghasemian, N., Moradi, R., Naghizadeh, M., & Landberg, T. (2020). Mitigating drought stress in sesame by foliar application of salicylic acid, beeswax waste and licorice extract. *Agricultural Water Management*, 231, 105997. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105997

Prerostova, S., Dobrev, P.I., Gaudinova, A., Knirsch, V., Körber, N., Pieruschka, R., Fiorani, F., Brzobohatý, B., Cerný, M., Spichal, L., Humplik, J., Vanek, T., Schurr, U. & Vankova, R. (2018). Cytokinins: Their impact on molecular and growth responses to drought stress and recovery in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 655. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00655

Ruffini, C. M., & Cremonini, R. (2009). Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62(2), 161-165.

http://www.caryologia.unifi.it/past_volumes/62_2/1557.pdf

Salek Mearaji, H., Tavakoli, A., & Niazsepahvand, A. A. (2020). The Effect of cytokinin on physiological and related traits with yield of quinoa under drought stress conditions. *Journal of Crops Improvement*, 22(3), 419–432. https://doi.org/10.22059/jci.2020.292821.2298 [In Persian].

Seify, S. M., Madani, H., Pourdad, S. S., Nour-Mohammadi, G., & Changizi, M. (2023). Impact of deficit irrigation on the physiological and agronomic traits of 24 safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes grown in Iran. *OCL-Oilseeds and fats, Crops and Lipids*, 30(27), 1-14. https://doi.org/10.1051/ocl/2023027

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). Plant Physiology, 4th edition. Sinauer Associates Inc. Publishers, Massachusetts, USA.

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Lux, A., & Vaculik, M. (2020). Silicon in plant biology: from past to present, and future challenges. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6699-6702. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa448

Ullah, A., Manghwar, H., Shaban, M., Khan, A. H., Akbar, A., Ali, U., Ali, E., & Fahad, S. (2018). Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 33103–33118. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3364-5

Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151(1), 59-66. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1

You, J., Zhang, Y., Liu, A., Li, D., Wang, X., Dossa, K., Zhou, R., Yu, J., Zhang, Y., Wang, L., & Zhang, X. (2019). Transcriptomic and metabolomic profiling of drought-tolerant and susceptible sesame genotypes in response to drought stress. *BMC Plant Biology*, 19, 267. https://doi.org/10.1038/s41598-017-09397-6

Yousefzadeh Najafabadi, M., & Ehsanzadeh, P. (2019). Effect of salicylic acid on photosynthetic pigments content, antioxidant enzyme activity and yield components of three sesame genotypes under different irrigation regimes. *Plant Process and Function*, 8(33), 137-152. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1091-en.html [In Persian].

Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., & Asghari, A. (2020). Evaluation of drought stress effect on seed oil yield and fatty acid composition in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), 735-747. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2205.1552 [In Persian].