Vol 27, No. 1, Spring 2025

University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Investigating the Effect of Iron Nanochelate on the Quantitative, Qualitative and Physiological Traits of Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) under Dificit Irrigated Conditions

Saman Valizadeh[1] | Mashalah Daneshvar[2]✉ | Sajjad Rahimi-Moghaddam[3] | Abbas Almoderes[4]

1. Departmant of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University. Khoramabad, Iran. E-mail: valizadeh.sa@fa.lu.ac.ir
2. Corresponding Author, Departmant of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University. Khoramabad, Iran. E-mail: daneshvar.m@lu.ac.ir
3. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: rahimi.s@lu.ac.ir
4. Department of Biology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: a.almodares@sci.ui.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 15 November 2023
Received in revised form
21 December 2024
Accepted 18 January 2025
Published online 5 March 2025

Keywords:
Deficit of water
Harvest index
Micronutrients
Transpiration rate

ABSTRACT

Objective: To investigate the potential for increasing the yield and quality of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) by utilizing nanochelates in low irrigation conditions.

Method: This experiment was conducted using split plots with three repetitions over two years, 2016-2017 and 2017-2018. The irrigation regime was compared at two levels: 90% (normal irrigation) and 50% (deficient irrigation) of the field capacity in the main plots. Additionally, foliar spraying of Khazra iron nano chelate fertilizer was applied at five levels of 0, 2, 4, 6 and 8 per thousand in the secondary plots. At the end, the characteristics of leaf relative water content, photosynthesis and transpiration rate, mesophyll conductance, the amount of photosynthetic pigments chlorophyll a and b, carotenoids, biological yield, seed yield and harvest index were evaluated. Photosynthesis rate, transpiration rate and mesophyll conductance were measured using a photosynthesizer (model CI-304 made in America) during the flowering stage on the youngest fully opened leaf between 10 am and 2 pm. Chlorophyll a, b and carotenoid levels were measured through randomly sampling mature leaves and extracting them using acetone.

Results: The interaction between irrigation and iron nano-fertilizer (INF) had a significant impact on transpiration rate, mesophilic conductance, chlorophyll b, carotenoid content, and grain yield at a 1% significance level, and on biological yield at a 5% significance level. The application of iron nano chelate helped alleviate the negative effects of water deficit on grain yield traits, biological performance, chlorophyll b and carotenoid pigments, transpiration rate and mesophilic conductance. The combined effects of irrigation and fertilizer on mesophilic conductivity showed that there was no significant difference between irrigation regimes at 50% and 90% of field capacity for any levels of iron fertilizer except at the 4 per thousand level. Similarly, when comparing the interactive effects of water and fertilizer on transpiration rate and chlorophyll b characteristics of the plant, similar results were observed with mesophilic guidance. The use of 4 parts per thousand iron nano-fertilizer increased biological yield under 50% field capacity irrigation compared to the same irrigation without iron nano-fertilizer. Furthermore, grain yield in the 50% field capacity irrigation was 17% higher with iron nano-fertilizer application compared to without it.

Conclusions: The foliar application of nano-chelated iron fertilizer, combined with irrigation at 50% of field capacity and a concentration of 4 per thousand of this fertilizer, is considered the most effective treatment for sweet sorghum in regions with deficiently irrigated conditions.

Cite this article: Valizadeh, S., Daneshvar, M., Rahimi-Moghaddam, S., & Almoderes, A. (2025). Investigating the Effect of Iron Nanochelate on the Quantitative, Qualitative and Physiological Traits of Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) under Dificit Irrigated Conditions. *Journal of Crops Improvement*, 27 (1), 41-55.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2025.367629.2865

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2025.367629.2865

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی
Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

بررسی اثر نانوکلات آهن بر صفات کمی، کیفی و فیزیولوژیک سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) در شرایط کم‌آبیاری

سامان والیزاده[۱] | ماشالله دانشور[۲]✉ | سجاد رحیمی‌مقدم[۳] | عباس المدرس[۴]

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان. خرم آباد، ایران. رایانامه: valizadeh.sa@fa.lu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان. خرم آباد، ایران. رایانامه: daneshvar.m@lu.ac.ir
۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir
۴. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: a.almodares@sci.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

کلیدواژه‌ها:
سرعت تعرق
شاخص برداشت
عناصر ریزمغذی
کمبود آب

چکیده

هدف: بررسی امکان افزایش عملکرد و کیفیت سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) با کاربرد نانوکلات در شرایط کم‌آبیاری می‌باشد.

روش پژوهش: این آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده با سه تکرار و در دو سال ۱۳۹۶–۹۷ و ۹۷–۱۳۹۸ انجام گردید. رژیم آبیاری در دو سطح ۹۰ (آبیاری نرمال) و۵۰ (کم‌آبیاری) درصد ظرفیت زراعی در کرت‌های اصلی و محلول‌پاشی کود نانوکلات آهن خضرا در پنج سطح صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ در هزار در کرت‌های فرعی مقایسه گردید. در پایان صفات محتوای نسبی آب برگ، سرعت فتوسنتز و تعرق، هدایت مزوفیل، میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی کلروفیل a و b، کاروتنوئیدها، عملکرد بیولوژیکی، عملکرد دانه و شاخص برداشت مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: اثر برهم‌کنش دو جانبه آبیاری و محلول‌پاشی کود نانوآهن بر صفات سرعت تعرق، هدایت مزوفیلی، میزان کلرفیلb ، کاروتنوئید و عملکرد دانه در سطح یک درصد و عملکرد بیولوژیک درسطح ۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار شد. اثر متقابل دو جانبه آبیاری در کود بر هدایت مزوفیلی نشان داد که در هر یک از سطوح کود آهن (به‌جز سطح ۴ در هزار) تفاوت معنی‌دار بین رژیم‌های آبیاری ۵۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی وجود نداشت. مقایسه میانگین دو گانه آب در کود بر صفات سرعت تعرق و کلروفیل b گیاه نتایجی مشابه با هدایت مزوفیلی داشت. کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن توانسته عملکرد بیولوژیک را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری، ۱۶ درصد و عملکرد دانه را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری، ۱۷ درصد افزایش دهد.

نتیجه‌گیری: کاربرد محلول‌پاشی کود نانوکلات آهن، تلفیق تیماری سطح آبیاری۵۰ درصد ظرفیت زراعی همراه با سطح ۴ در هزار این کود در سورگوم شیرین در شرایط کم‌آبی منطقه بهترین تیمار محسوب می‌گردد.

استناد: والیزاده، سامان؛ دانشور، ماشالله؛ رحیمی‌مقدم، سجاد و المدرس، عباس (۱۴۰۴). بررسی اثر نانوکلات آهن بر صفات کمی، کیفی و فیزیولوژیک سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) در شرایط کم‌آبیاری . *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۷ (۱)، ۴۱–۵۵.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2025.367629.2865

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

۱. مقدمه

اکثر مناطق ایران در سال‌های اخیر تحت تأثیر گرمایش زمین خشک‌تر شده‌اند (علیزاده چوبری۱ و نجفی۲ ،۲۰۱۸). کیم۳ و بائه۴ (۲۰۲۱) استدلال می‌کنند که مناطق خشک احتمالاً تحت گرمایش جهانی آینده گسترش خواهند یافت. سورگوم شیرین۵، گیاهی است که به مراتب نسبت به ذرت از تحمل به خشکی بالاتری برخوردار است (پرین۶ و همکاران، ۲۰۱۸)، به‌طور گسترده برای تولید خوراک دام در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری به‌ویژه، آسیا، آفریقا و بسیاری کشورهای در حال توسعه کشت می‌شود. کشور هند بزرگ‌ترین پرورش‌دهنده سورگوم در جهان است که ۷/۵ میلیون هکتار از اراضی آن به پرورش سورگوم شیرین اختصاص دارد و پس از آن نیجریه (۶/۷ میلیون هکتار) و سودان (۶/۶ میلیون هکتار) است (رائو۷ و همکاران، ۲۰۱۳).

نانوکودها به‌دلیل آزادسازی آرام و کنترل‌شدهٔ مواد غذایی، به‌منظور تأمین عناصر موردنیاز گیاه در هر دو روش جذب برگی و ریشه‌ای، نسبت به کودهای مرسوم برتری دارند. نانوآهن از طریق تأثیر بر رشد ریشه می‌تواند مقاومت به خشکی را بهبود می‌بخشد (سویدر۸ و اسکمید۹، ۱۹۷۴). ترکیبات کلاته آهن بهترین راه‌حل برای برطرف کردن کلروز آهن در همه خاک‌ها و به خصوص خاک‌های قلیایی بوده و می‌توانند شدیدترین مشکلات تغذیه‌ای گیاهان را علاج نمایند. کلات آهن نسبت به خود آهن قابلیت جذب بالاتری دارد. نانوکلات آهن خضرا دارای کمپلکس منحصربه‌فردی می‌باشد و این نانوکمپلکس دارای ۹ درصد آهن محلول در آب در بازه ۱۱< اسیدیته >۳ می‌باشد. مکمل‌های روی و منگنز در این کود نقش خاص خود را ایفا می‌کنند. بر این اساس می‌توان بیان نمود که محلول‌پاشی نانوکلات آهن می‌تواند در افزایش تحمل سورگوم شیرین به تنش کم‌آبی مفید باشد. بنابراین، پژوهش فوق با هدف بررسی امکان افزایش عملکرد و کیفیت سورگوم شیرین با کاربرد نانوکلات در شرایط کم‌آبیاری می‌باشد.

۲. پیشینهٔ پژوهش

۲. ۱. پیشینهٔ نظری

سورگوم شیرین دارای ویژگی‌های بازده فتوسنتزی بالا (گئو۱۰ و همکاران، ۲۰۱۸)، میزان قند قابل تخمیر زیاد در ساقه‌ها و تحمل بالای نمک است (وسیلاکوگلئو۱۱ و همکاران، ۲۰۱۱؛ سوئی و همکاران۱۲، ۲۰۱۵). به‌عنوان یک محصول چهار کربنه، در شرایط تنش توانایی تولید زیست‌توده زیادی را دارد. بازده مصرف نیتروژن بالا، آن را قادر می‌سازد دو تا سه برابر بیش‌تر زیست‌توده در هر برداشت نسبت به محصول علوفه‌ای متداول مانند ذرت تولید کند (زی۱۳ و زو۱۴، ۲۰۱۹). در مقایسه با محصولات زراعی، سورگوم شیرین مزایای داشتن تحمل به درجه حرارت بالا و خشکی، بازده بالا، نیاز کم به باروری خاک، و

1. Alizadeh-Choobari
2. Najafi
3. Kim
4. Bae
5. Sorghum bicolor (L.) Moench
6. Perrin
7. Rao
8. Soyder
9. Schmidt
10. Guo
11. Vasilakoglou
12. Sui
13. Xie
14. Xu

قابلیت هضم خوب را نشان می‌دهد (چن[1] و همکاران، ۲۰۱۸). تنش کم‌آبی باعث کاهش شدید هدایت مزوفیلی و درنتیجه کاهش ظرفیت فتوسنتزی در کلروپلاست می‌گردد (کوک[2] و همکاران، ۲۰۰۳). افزایش عملکرد دانه با استفاده از ریز مغذی‌ها می‌تواند علت‌های متفاوتی داشته باشد که از آن جمله می‌توان به افزایش بیوسنتز اکسین در حضور آهن، افزایش غلظت کلروفیل، افزایش غلظت فسفوانول پیروات کربوکسیلاز و ریبولوزبیس‌فسفات کربوکسیلاز، افزایش کارایی جذب نیتروژن و فسفر در حضور آهن اشاره کرد (رحمانی[3] و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از نانوکودها ، به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن آثار منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌انجامد ، لذا گیاه قادر به جذب بیش‌ترین مقدار مواد غذایی بوده و در نتیجه ضمن کاهش آب‌شویی عناصر، عملکرد محصول نیز افزایش می‌یابد (مهدوی خرمی و همکاران، ۱۳۹۷). نانوکلات آهن نسبت به کلات آهن معمولی در افزایش غلظت آهن در گیاه به‌صورت معنی‌دار تأثیر برتری دارد که احتمالاً به‌علت ویژگی‌های ذرات نانو بوده است (پرداختی وهمکاران، ۱۳۸۵).

۲. ۲. پیشینهٔ تجربی

کمبود آب ۳۰ تا ۷۰ درصد باعث کاهش بازدهی ساقه و بازدهی قند سورگوم شیرین شد. هم‌چنین عملکرد تئوری اتانول به میزان ۱۲۰/۹–۱۸۰/۹ لیتر در هکتار کاهش یافت اما بریکس و محتوای قند آن ۱۱۱/۴ درصد افزایش یافت (السند[4]و امار[5]، ۲۰۲۳). نتایج آزمایش نصیرپور و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که تأثیر سطوح آبیاری بر صفات ارتفاع بوته، تعداد دانه در خوشه، عملکرد دانه و زیستی و کارایی مصرف آب سورگوم دانه‌ای در سطح احتمال ۱ درصد و بر صفت وزن هزاردانه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین ارتفاع بوته، تعداد دانه در خوشه، وزن هزاردانه، عملکرد دانه و بیولوژیک از تیمار آبیاری در شرایط نرمال رطوبتی (۷۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) و بیشینه کارایی مصرف آب (۱/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) از تیمار آبیاری در شرایط تنش خشکی شدید (۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر) به‌دست آمد. نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از ارزیابی تأثیر تنش خشکی بر ارقام و لاین‌های امیدبخش سورگوم دانه‌ای نشان داد که اثرات اصلی آبیاری و رقم بر وزن هزاردانه و وزن پانیکول و اثر متقابل آبیاری و رقم بر عملکرد دانه معنی‌دار بود. بیش‌ترین عملکرد دانه (۱۰.۸۱ تن در هکتار) در تیمار۶۰ میلی‌متر تبخیر و رقم سپیده حاصل شد (خزائی و همکاران، ۱۳۹۷). در بررسی اثر محلول‌پاشی کود نانوکلات آهن خضرا و منگنز بر کاهش اثرات کمبود آب و عملکرد کمی و کیفی ذرت دانه‌ای هیبرید ۷۰۴، نتایج نشان داد که در زمان کم‌آبی، محلول‌پاشی دو در هزار کمپلکس میکرو و در مواقع عادی و بدون‌تنش محلول‌پاشی دو در هزار نانوکلات آهن در مرحله رویشی و یک در هزار نانومنگنز در مرحله زایشی مناسب‌تر بود. بنابراین، عوارض جانبی ناشی از کمبود آب می‌تواند در این منطقه و مناطق مشابه با محلول‌پاشی آهن و منگنز کاهش یابد (نجفی‌فر و همکاران، ۱۳۹۵).

۳. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش طی دو سال زراعی ۱۳۹۸–۱۳۹۶ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان واقع در شهرستان خرم‌آباد، کیلومتر ۱۲ جاده اندیمشک با طول جغرافیایی ۴۸/۳۵ درجه و ۳۳/۴۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه

1. Chen
2. Koc
3. Rahmani
4. Alsanad
5. Emara

و ۲۹ دقیقه شمالی، ارتفاع از سطح دریا ۱۱۴۷/۸ متر و متوسط بارندگی سالیانه ۵۲۰/۱۷ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۸/۶۱ درجه سانتی‌گراد (براساس آمار ۳۰ سال منتهی به ۱۳۹۶) و اقلیم نیمه‌خشک انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده با سه تکرار و دو سطح آبیاری (۵۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی) در کرت‌های اصلی و پنج سطح محلول‌پاشی کود نانوکلات آهن خضرا (حاوی ۹ درصد آهن ساخت شرکت صدور احرار شرق) (صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ در هزار) بود که در دو مرحله رشد رویشی (قبل به ساقه‌رفتن) و مرحله زایشی (شروع پرشدن دانه) در کرت‌های فرعی اجرا شد. محلول‌پاشی با استفاده از سمپاش ۲۰ لیتری پشتی روی شاخ و برگ گیاه اعمال شد. کاشت در دهه سوم اردیبهشت‌ماه پس از رسیدن دمای خاک به ۱۲ درجه سانتی‌گراد و برداشت نهایی در دهه دوم شهریورماه زمان رسیدن نهایی دانه‌ها انجام گرفت. پارامترهای آب‌وهوایی منطقه در هر دو سال آزمایش و در طی بازه زمانی ۳۰ ساله در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. شرایط آب‌وهوایی محل آزمایش

ماه	آمار ۳۰ سال منتهی به ۱۳۹۶			سال ۹۶-۹۷		سال۹۷-۹۸	
	بارندگی (میلی‌متر)	رطوبت نسبی (درصد)	متوسط دما (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	متوسط دما (درجه سانتی‌گراد)	بارندگی (میلی‌متر)	متوسط دما (درجه سانتی‌گراد)
مهر	۱۰/۵۴	۳۴/۷۲	۲۲/۴۱	۰	۲۰/۶	۹	۲۲/۲
آبان	۵۵/۸۰	۵۵/۶	۱۵/۰۷	۸/۶۱	۱۵/۳	۱۳۹/۱	۱۳/۸
آذر	۸۰/۶۰	۶۳/۳۴	۸/۸۳	۶۶/۲۲	۶/۹	۱۵۰/۸	۸/۶
دی	۷۴/۷۱	۶۵/۸۹	۵/۹۰	۸۲/۶۱	۷/۰	۱۲۷	۶/۱
بهمن	۸۱/۵۳	۶۳/۸۶	۶/۴۵	۱۰۱	۷/۷	۱۱۵/۲	۶/۵
اسفند	۷۹/۳۶	۵۷/۸۷	۱۰/۰۶	۱۹/۳۲	۱۱/۵	۸۹/۳	۷/۴
فروردین	۷۷/۱۹	۵۶/۷۸	۱۴/۸۱	۱۰۴/۶	۱۵/۳	۳۰۹/۱	۱۲/۳
اردیبهش	۵۳/۶۳	۵۲/۰۴	۲۰/۲۱	۱۴۰/۹	۱۷/۲	۶/۱	۱۷/۸
خرداد	۴/۶۵	۳۱/۸	۲۶/۷۷	۱۲/۹	۲۴/۶	۰	۲۶/۴
تیر	۰/۰۰	۲۵/۷۶	۳۱/۶۵	۰	۳۰/۷	۰	۳۰/۰
مرداد	۱/۲۴	۲۴/۶۷	۳۲/۷۴	۰	۳۱/۳	۰	۳۱/۵
شهریور	۰/۹۳	۲۶/۸۷	۲۸/۴۷	۲/۴	۲۷/۹	۰	۲۷/۲

متوسط بارندگی ۳۰ سال در خرم‌آباد برابر ۵۲۰/۱۷ میلی‌متر، در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ برابر ۵۳۸/۵۶ میلی‌متر و در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ برابر ۹۴۵/۶ میلی‌متر بود. متوسط دمای ۳۰ ساله خرم آباد برابر ۱۸/۶۱ درجه سانتی‌گراد و متوسط رطوبت نسبی ۳۰ ساله خرم‌آباد ۴۶/۶ درصد بود.

قبل از اجرای آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک، نمونه‌برداری صورت گرفت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک محل انجام آزمایش

سال	عمق	بافت	هدایت الکتریکی	اسیدیته	کربن	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی
	(سانتی‌متر)		(دسی‌زیمنس بر متر)		(درصد)		(میلی‌گرم بر کیلوگرم)			
۹۷-۱۳۹۶	۳۰-۰	لومی رسی	۰/۴۵	۷/۱	۰/۸۶	۰/۰۷۸	۴/۸۵	۳۶۷	۴/۴	۰/۷
۹۸-۱۳۹۷	۳۰-۰	لومی رسی	۰/۴۵	۷/۱	۰/۹۰	۰/۰۶	۵/۲	۴۶۹	۴/۱	۰/۶

عملیات زراعی از جمله شخم بهاره، دیسک، تسطیح، کوددهی و تهیه جوی و پشته اعمال شد. مقادیر کودهای شیمیایی مصرفی نیتروژن از منبع اوره به‌میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، فسفر از منبع سوپرفسفات‌تریپل به‌میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و براساس آزمایش خاک بود که قبل از تهیه جوی و پشته در سطح خاک پخش و با دیسک در خاک مخلوط گردید. نیمی از اوره پیش از کاشت و نیم دیگر آن در ابتدای گلدهی مورداستفاده قرارگرفت. قبل از کاشت

ازعلف‌کش آترازین به میزان ۱ کیلوگرم در هکتار برای کنترل علف‌های هرز استفاده شد. عملیات کاشت بذررقم سوفرا (سورگوم شیرین رقم سوفرا یک رقم مناسب مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری) به‌صورت هیرم‌کاری و در عمق ۴-۳ سانتی‌متری کف جوی انجام شد. فاصله بین کرت‌های اصلی از هم ۳ متر، فاصله بین کرت‌های فرعی از هم ۱ متر، تعداد خطوط در هر کرت شش خط ۴ متری، فاصله بین خطوط کشت ۶۰ سانتی‌متر (ابعاد کرت فرعی ۴×۳/۶)، فاصله بین بذور سبزنشده روی خط کاشت ۱۵ سانتی‌متر و فاصله بین بلوک‌ها ۳ متر در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی کود آهن با سمپاش ۲۰ لیتری پشتی انجام گرفت. در ضمن جهت جلوگیری از نشت محلول کودی به کرت‌های مجاور از حفاظ پلاستیکی در اطراف کرت استفاده شد و زمان محلول‌پاشی نیز در دو مرحله رشد رویشی (قبل به ساقه‌رفتن) و مرحله زایشی (شروع پرشدن دانه) در اوایل صبح انجام گرفت. دو سطح آبیاری از استقرار کامل گیاه سورگوم (مرحله دو برگی) تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک گیاه اعمال شد. در این پژوهش نیاز آبی گیاه براساس کمبود رطوبت خاک در عمق ریشه گیاه تعیین شد. محاسبه بارندگی مؤثر به‌روش USDA از رابطه (۱) محاسبه شد (خوشحال دستجردی و روشنی، ۱۳۹۱).

رابطه ۱) $ER=R(125-0/2R)/125 \ (R<250mm)$
$ER=125+0/1R \ (R>250mm)$

که در آن ER بارش مؤثر در هر ماه (میلی‌متر) و R بارش هر ماه (میلی‌متر).

برای محاسبه عمق آب آبیاری، نمونه‌برداری ازخاک پروفیل پای ریشه به‌منظور تعیین درصد رطوبت خاک درآون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. عمق و حجم آب آبیاری از روابط (۲) تا (۴) محاسبه گردید (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۹).

رابطه ۲) $dn= (\Theta fc- \Theta i) \times Pb \times Zr$

رابطه ۳) $dg=dn/ Ea$

رابطه ۴) $V= (dg \times A \times f)$

در این روابط، dn: عمق خالص آبیاری(میلی‌متر)، Θi: درصد رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری، Θfc: درصد رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت زراعی، Pb: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، Zr: عمق توسعه ریشه (میلی‌متر)، dg: عمق ناخالص آبیاری (میلی‌متر)، Ea: راندمان آبیاری که با توجه به بررسی‌های مزرعه ای، ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. حجم آب ورودی به هر کرت به‌وسیله کنتور حجمی اعمال شد، V: حجم آب آبیاری در هر نوبت آبیاری (مترمکعب است که تبدیل به لیتر می‌شود، A: سطح هر کرت (مترمربع) و f : ضریب مربوط به تیمار موردنظر که برای تیمار عدم تنش خشکی یک و برای تیمار تنش خشکی ۰/۵ در نظر گرفته شد.

با استفاده از تبخیر و تعرق گیاه و مقدار عمق خالص آبیاری دور آبیاری با استفاده از رابطه (۵) محاسبه گردید.

رابطه ۵) $T= \frac{d_n}{ET_{Max}}$

رطوبت ظرفیت زراعی خاک مزرعه به‌روش وزنی معادل ۱۷/۷ درصد که با در نظرگرفتن چگالی ظاهری خاک مزرعه (۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب) معادل ۲۳ درصد حجمی بود. حجم آب مصرفی برای ۹۰ در صد ظرفیت زراعی در سال اول ۶۸۹۱/۸ مترمکعب در هکتار و برای سال دوم ۶۴۹۱/۸ مترمکعب در هکتار و حجم آب مصرفی برای ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در سال اول ۳۸۲۸/۸ مترمکعب در هکتار و برای سال دوم ۳۶۰۶/۶ مترمکعب در هکتار بود.

۳. ۱. صفات کیفی و فیزیولوژیک

۳. ۱. ۱. میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید

اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته در مرحله گلدهی صورت گرفت. میزان کلروفیل

a، b و کاروتنوئید با استفاده از روش آرنون۱ (۱۹۴۹) با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون اندازه‌گیری شد. میزان جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Vis 2100 ساخت کشور آمریکا) در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر (به‌ترتیب برا کاروتنویید،کلروفیل a و کلروفیل b) قرائت گردید. در نهایت مقدار هر یک از این صفات با استفاده از روابط (۵) تا (۷) محاسبه شد.

رابطه ۵) $\text{Chlorophyll a} = (12.7\times OD.663) - (2.69\times OD.645) \times V/1000\times W$

رابطه ۶) $\text{Chlorophyll b} = (22.9\times OD.645) - (4.68OD.663) \times V/1000\times W$

رابطه ۷) $\text{Carotenoides} = 100(A470) - 3.27(\text{mg chl. a}) - 104(\text{mg chl. b})/227 \times V/1000\times W$

که در آن، V: حجم نمونه، OD: میزان جذب نور، W: وزن تر نمونه است.

۳. ۱. ۲. محتوای نسبی آب برگ پرچم

محتوای نسبی آب برگ پرچم در مرحله پرشدن دانه طبق روش ریچی۲ و همکاران (۱۹۹۰) انجام شد و درنهایت محتوای نسبی آب برگ از طریق رابطه (۸) محاسبه گردید.

رابطه ۸) $\text{RWC (\%)} = (FW- DW/ TW- DW)$

که در آن، RWC: محتوای نسبی آب برگ پرچم، FW: وزن برگ تازه، DW: وزن خشک برگ و TW: وزن اشباع برگ نمونه‌ها است.

۳. ۱. ۳. پارامترهای تبادلات گازی

اندازه‌گیری سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی با استفاده از دستگاه فتوسنتزمتر (مدل CI-304 ساخت آمریکا) در مرحله‌ی گلدهی روی جوان‌ترین برگ کاملاً باز شده و بین ساعت ۱۰ صبح تا ۱۴ عصر انجام گرفت.

۳. ۲. صفات کمی (عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت)

برای اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک در مرحله رسیدگی نهایی گیاه، بوته‌های حاصل از یک مترمربع از هر کرت کف‌برشده و در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک وسپس وزن خشک کل بوته‌ها توزین شد. عملکرد دانه نیز با جداسازی دانه‌ها و توزین آن‌ها براساس ۱۲ درصد رطوبت دانه اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت محصول با تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک بر حسب درصد به‌دست آمد.

۳. ۳. آنالیز آماری

تجزیه مرکب دو ساله داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت و نمودارها با نرم‌افزار اکسل رسم گردید.

1. Arnon
2. Ritchie

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. صفات فیزیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس حاصل از دو سال اجرای آزمایش (جدول ۳) نشان داد، اثر سال فقط بر میزان کاروتنوئید در سطح احتمال ۱ درصد داشت معنی‌دار و در دیگر صفات اثر معنی‌دار نداشت. رژیم آبیاری بر صفات میزان کلروفیل a و سرعت فتوسنتز اثر معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و بر دیگر صفات فیزیولوژیک این پژوهش در سطح ۵ درصد داشت. اثر محلول‌پاشی نانوکود آهن بر محتوای نسبی آب برگ در سطح احتمال ۵ درصد و بر دیگر صفات در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. برهم‌کنش آبیاری و محلول‌پاشی نانوکود آهن فقط بر صفات میزان کلروفیل b، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی در سطح احتمال ۱ درصد و بر صفت میزان کاروتنوئید در سطح ۵ درصد معنی‌دار و بر دیگر صفات اثر معنی‌دار نداشت.

جدول ۳. میانگین مربعات و سطح معنی‌دار نتایج تجزیه واریانس مرکب دوساله صفات کیفی و فیزیولوژیک

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای آب نسبی	کاروتنوئید	کلروفیل b	کلروفیل a	سرعت تعرق	سرعت فتوسنتز	هدایت مزوفیلی
سال (Y)	۱	۱/۰۹۵ns	۰/۰۲۹**	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۹ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۷۵۲ns	۰/۰۰۱ns
سال× بلوک	۴	۴۵/۵۴۶ns	۰/۰۰۰۴ns	۰/۰۰۰۵ns	۰/۰۰۱۷ns	۰/۰۰۰۴ns	۱/۴۳ns	۰/۰۰۱ns
رژیم آبیاری (I)	۱	۱۵۷۳/۵۴۷*	۰/۰۵۸*	۰/۰۳۳*	۰/۲۹۵**	۰/۰۲۷*	۲۴۷/۹۵۶**	۰/۱۱۱*
Y×I	۱	۴/۲۱۱ns	۰/۰۰۰۵ns	۰/۰۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۱۱۹ns	۰/۰۰۰۶ns
خطاa	۴	۵۹/۳۸۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰۷	۲/۶۹۲	۰/۰۰۴
نانوکود آهن (N)	۴	۱۳۵/۷۵۳*	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۸**	۰/۰۱۵**	۰/۰۰۷**	۱۳/۰۹۰**	۰/۰۱۲**
Y×N	۴	۱۴/۱۱۷ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۲ns	۰/۰۰۰۴ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۳۲۶ns	۰/۰۰۱ns
I×N	۴	۶۲/۷۴۸ns	۰/۰۰۱۴*	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۴ns	۰/۰۰۲**	۳/۳۴۴ns	۰/۰۰۸**
Y×I×N	۴	۴۸/۵۱۴ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۸ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۶۶۳ns	۰/۰۰۸ns
خطاb	۴	۳۵/۹۲۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۴	۰/۶۱۶	۰/۰۰۱
ضریب تغییرات (درصد)		۸/۱	۴/۷۴۸	۴/۹۴	۵/۵۱	۴/۹۳۶	۵/۵۰۹	۵/۷۱

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و بدون اختلاف معنی‌دار.

نتایج مقایسه میانگین اثر ساده تیمارها نشان داد که سال‌ها به‌جز در یک صفت (میزان کاروتنوئید)، در بقیه صفات از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار با هم نداشت (جدول ۴). مقایسه میانگین اثرات اصلی رژیم آبیاری نشان داد که بین هر دو سطح آبیاری از نظر تمام صفات کیفی و فیزیولوژیکی تفاوت معنی‌دار آماری وجود داشت و رژیم آبیاری بر مبنای ۹۰ درصد ظرفیت زراعی، بیش‌ترین مقدار هر یک از صفات فوق را ایجاد کرد و رژیم آبیاری کم‌آبی ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، مقدار صفات فوق را به‌صورت معنی‌دار کاهش داد. دلیل آن را می‌توان کاهش آب آبیاری مصرفی و بروز تنش ناشی از این رژیم کم‌آبی دانست (حجم آب مصرفی برای ۹۰ درصد ظرفیت زراعی در سال اول و دوم به‌ترتیب ۶۸۹/۱۸ و ۶۴۹/۱۸ لیتر در مترمربع و حجم آب مصرفی برای ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در سال اول و دوم آزمایش به‌ترتیب ۳۸۲/۸۸ و ۳۶۰/۶۶ لیتر در مترمربع بود).

مقایسه میانگین اثرات اصلی کود نشان داد با کاربرد و مصرف کود در قیاس با شاهد (عدم مصرف کود) مقدار هر یک از صفات (جدول ۴) را بطور معنی‌دار افزایش داد و سطوح مصرفی ۴ و ۶ در هزار این کود سبب تولید بالاترین مقدار در اکثریت این صفات گردید و کاربرد دز بالاتر این کود یعنی ۸ در هزار، مقدار بعضی از این صفات را کاهش داد.

جدول ٤. مقایسه میانگین اثر اصلی (ساده) تیمارهای آزمایش بر صفات فیزیولوژیک سورگوم شیرین

تیمار		محتوای آب نسبی (درصد)	کاروتنوئید (میلی گرم بر گرم وزن تر برگ)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر برگ)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر برگ)	سرعت تعرق (میکرومول آب بر مترمربع در ثانیه)	سرعت فتوسنتز (میکرومول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)	هدایت مزوفیلی (میکرومول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)
سال	۹۷-۱۳۹۶	۷۴/۱۳a	۰/۳۳a	۰/۴۴a	۰/۵۰a	۰/۳۹a	۱۴/۳۶a	۰/۶۳۲a
	۹۸-۱۳۹۷	۷۳/۸۶a	۰/۲۹b	۰/۴۳a	۰/۴۹a	۰/۳۹a	۱۴/۱۴a	۰/۶۲۴a
رژیم آبیاری	۹۰ درصد ظرفیت زراعی	۷۹/۱۲a	۰/۳۴a	۰/۴۶a	۰/۵۶a	۰/۴۱a	۱۶/۲۸a	۰/۶۷۱a
	۹۰ درصد ظرفیت زراعی	۶۸/۸۸b	۰/۲۸b	۰/۴۱b	۰/۴۲b	۰/۳۷b	۱۲/۲۲b	۰/۵۸۵b
نانوکود آهن	صفر در هزار	۶۸/۱۷b	۰/۲۸c	۰/۳۹b	۰/۴۵d	۰/۳۵b	۱۳/۰۸d	۰/۵۷۷c
	دو در هزار	۷۶/۲۴a	۰/۳۱b	۰/۴۴a	۰/۴۸c	۰/۴۰a	۱۴/۰۰c	۰/۶۴۰ab
	چهار در هزار	۷۶/۰۲a	۰/۳۲a	۰/۴۵a	۰/۵۲b	۰/۴۱a	۱۴/۹۸b	۰/۶۶۳a
	شش در هزار	۷۵/۴۸a	۰/۳۳a	۰/۴۴a	۰/۵۴a	۰/۴۰a	۱۵/۶۸a	۰/۶۲۲b
	هشت در هزار	۷۴/۰۷a	۰/۳۰b	۰/۴۴a	۰/۴۶cd	۰/۴۰a	۱۳/۰۸cd	۰/۶۳۸ab

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

نتایج مقایسه میانگین (جدول ۵) اثر متقابل دو جانبه آبیاری در کود بر هدایت مزوفیلی نشان داد که در هر یک از سطوح کود آهن (به‌جز سطح ۴ در هزار) تفاوت معنی‌دار بین رژیم‌های آبیاری ۵۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی وجود نداشت. مقایسه میانگین دوگانه آب در کود بر صفات سرعت تعرق و کلروفیل b گیاه نتایجی مشابه با هدایت مزوفیلی داشت. بدین نحو که در هر یک از سطوح کود (به‌جز سطح ۴ در هزار کود) دو رژیم آبیاری تفاوت معنی‌دار آماری با هم نداشتند. مقایسه میانگین اثر دو جانبه آب در کود بر صفت کاروتنوئید نیز نشان داد که در هر یک از سطوح کود، اختلاف معنی‌داری بین دو سطح رژیم آبیاری وجود داشت و بیش‌ترین میزان کاروتنوئید از تلفیق دو جانبه آبیاری ۹۰ درصد ظرفیت زراعی و سطح ۶ در هزار کود (که خود به‌تنهایی در یک گروه آماری قرار گرفت) و کم‌ترین میزان این صفت در تیمار آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون مصرف کود (شاهد) تولید شد.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و کود آهن بر صفات فیزیولوژیک سورگوم شیرین

تیمار	کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ)	سرعت تعرق (میکرومول آب بر مترمربع در ثانیه)	هدایت مزوفیلی (میکرومول دی‌اکسیدکربن بر مترمربع در ثانیه)
I1*N1	۰/۳۰۹c	۰/۴۰۵de	۰/۳۶۴de	۰/۶۰۷cd
I1*N2	۰/۳۳۷b	۰/۴۶۲bc	۰/۴۱۶bc	۰/۶۸۱ab
I1*N3	۰/۳۳۹b	۰/۴۵۸c	۰/۴۱۲c	۰/۶۷۱ab
I1*N4	۰/۳۶۶a	۰/۴۷۷ab	۰/۴۲۹ab	۰/۶۸۲ab
I1*N5	۰/۳۴۶b	۰/۴۸۲a	۰/۴۳۴a	۰/۷۱۴a
I2*N1	۰/۲۵۰e	۰/۳۶۹f	۰/۳۳۲f	۰/۵۴۶e
I2*N2	۰/۲۷۹d	۰/۴۲۱d	۰/۳۷۹d	۰/۵۹۹d
I2*N3	۰/۳۰۸c	۰/۴۴۹c	۰/۴۰۴c	۰/۶۵۴bc
I2*N4	۰/۲۹۰d	۰/۴۱۱de	۰/۳۷۰de	۰/۵۶۲de
I2*N5	۰/۲۵۸e	۰/۳۹۸e	۰/۳۵۸e	۰/۵۶۳de

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

I1,2 سطوح آبیاری (به‌ترتیب ۹۰ درصد و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی). N1 تا N5 سطوح کود (به‌ترتیب صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ در هزار)

۴. ۲. عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس حاصل از دو سال اجرای آزمایش (جدول ۶) نشان داد، اثر سال بر عملکرد دانه و شاخص برداشت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار و بر عملکرد بیولوژیک اثر معنی‌دار نداشت. رژیم آبیاری بر صفت شاخص برداشت اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و بر صفات عملکرد دانه و بیولوژیک در سطح ۵ درصد داشت. اثر محلول‌پاشی نانوکود آهن بر صفت شاخص برداشت در سطح احتمال ۵ درصد و بر صفات عملکرد دانه و بیولوژیک در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. برهم‌کنش آبیاری و محلول‌پاشی نانوکود آهن بر عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد و بر عملکرد بیولوژیک در سطح ۵ درصد معنی‌دار و بر شاخص برداشت اثر معنی‌دار نداشت.

جدول ٦. میانگین مربعات و سطح معنی‌دار نتایج تجزیه واریانس مرکب دو ساله صفات عملکردی

منابع تغییرات	درجه آزادی	شاخص برداشت	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیک
سال(Y)	۱	۷۷/۳۸۶**	۴/۴۵۴**	۱/۰۴۳ns
سال × بلوک	۴	۰/۵۶۳ns	۰/۰۴۳ns	۱/۴۹۳ns
رژیم آبیاری(I)	۱	۱۳/۸۸۸**	۱۶/۱۷۰*	۱۲۰/۴۳۳*
Y×I	۱	۰/۰۰۵ns	۰/۰۱۶ns	۰/۶۳۹ns
خطاa	۴	۱/۱۱۴	۰/۱۴۹	۴/۱۴۱
نانوکود آهن (N)	۴	۵/۱۸۸*	۰/۴۹۶**	۱۴/۷**
Y×N	۴	۰/۵۵۳ns	۰/۰۳۷ns	۱/۰۵۵ns
I×N	۴	۲/۳۷۴ns	۰/۳۰۴**	۸/۸۱۷*
Y×I×N	۴	۰/۵۰۲ns	۰/۰۲۴ns	۰/۹۶۹ns
خطاb	۴	۰/۴۸۲	۰/۰۴۷	۱/۳۹
ضریب تغییرات (درصد)	–	۲/۳۴۱	۳/۵۱	۵/۶۵

*، ** و ns: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و بدون اختلاف معنی‌دار.

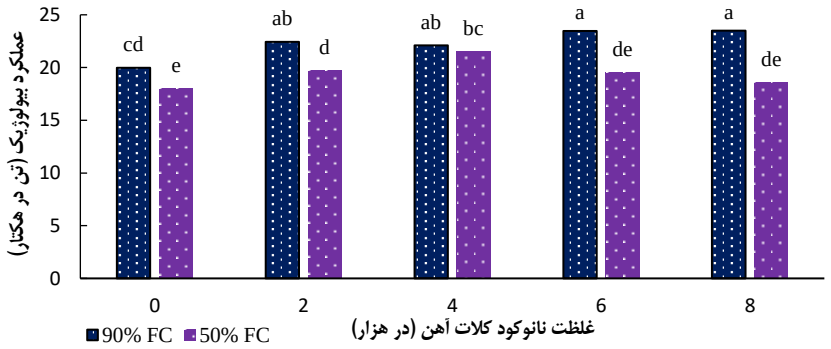
نتایج مقایسه میانگین (جدول ۷) اثر ساده تیمارها نشان داد که بین دو سال آزمایش از نظر آماری، دو صفت شاخص برداشت و عملکرد دانه تفاوت معنی‌دار بود. بین سطوح آبیاری ۵۰ درصد و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی نیز از نظر هر سه صفت عملکردی، تفاوت معنی‌دار آماری وجود داشت. بیش‌ترین نتایج صفات عملکردی این پژوهش در سال اول آزمایش (۹۷-۱۳۹۶) و رژیم آبیاری ۹۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد. کاربرد کود نانوکلات آهن در قیاس با شاهد، موجب افزایش معنی‌دار در دو صفت عملکرد دانه و بیولوژیک گردید، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقادیر عملکرد بیولوژیک (۲۱/۸۲ تن در هکتار) و عملکرد دانه (۶/۳۸۵ تن در هکتار) مربوط به کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن بود ولی این روند برای شاخص برداشت برعکس بود، به‌نحوی‌که بیش‌ترین مقدار شاخص برداشت (۳۰/۶۷ درصد) مربوط به عدم کاربرد نانوکود آهن (شاهد) بود.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارها بر صفات عملکردی سورگوم شیرین

	تیمار	عملکرد دانه (تن در هکتار)	عملکرد بیولوژیک (تن در هکتار)	شاخص برداشت (درصد)
سال	۱۳۹۶-۹۷	۶/۴۶a	۲۱/۰۱a	۳۰/۸a
	۱۳۹۷-۹۸	۵/۹۱b	۲۰/۷۴a	۲۸/۵۳b
رژیم آبیاری	۹۰ درصد ظرفیت زراعی	۶/۷۰a	۲۲/۲۹a	۳۰/۱۴a
	۹۰ درصد ظرفیت زراعی	۵/۶۷b	۱۹/۴۶b	۲۹/۱۸b
نانوکود آهن	صفر در هزار	۵/۸۴b	۱۸/۹۸b	۳۰/۶۷a
	دو در هزار	۶/۲۳a	۲۱/۰۷a	۲۹/۵۹b
	چهار در هزار	۶/۳۸a	۲۱/۸۲a	۲۹/۲۸b
	شش در هزار	۶/۲۴a	۲۱/۴۹a	۲۹/۰۷b
	هشت در هزار	۶/۲۲a	۲۱/۰۲a	۲۹/۶۱b

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

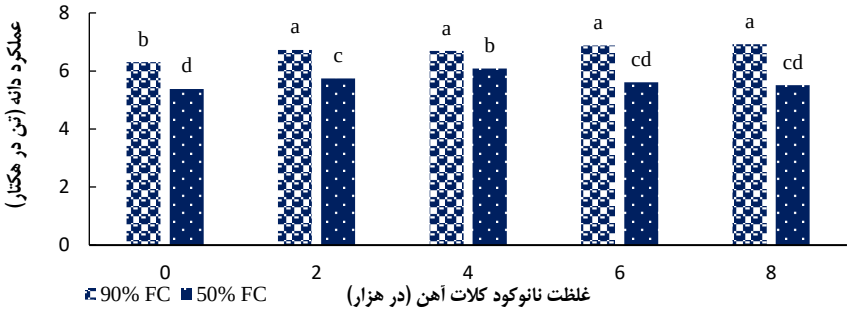
در شکل (۱) اثر متقابل رژیم آبیاری و محلول‌پاشی نانوکود آهن بر عملکرد بیولوژیک نشان داده شده است. بیش‌ترین عملکرد در برهم‌کنش رژیم آبیاری ۹۰ درصد همراه با کاربرد محلول‌پاشی غلظت ۸ در هزار نانوکود آهن (۲۳/۴۹ تن در هکتار) بود که نسبت به عدم کاربرد نانوکود با همین رژیم آبیاری ۱۵ درصد افزایش عملکرد نشان داد. کم‌ترین مقدار عملکرد بیولوژیک در عدم کاربرد نانوکود آهن و رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۱۷/۹۸ تن در هکتار) مشاهده شد. در هر سطح کود (به‌جز سطح ۴ در هزار) بین رژیم‌های آبیاری ۵۰ و ۹۰ درصد ظرفیت زراعی از نظر آماری تفاوت معنی‌دار در این صفت وجود نداشت. کاربرد نانوکود آهن در شرایط کم‌آبی تا غلظت ۴ در هزار توانسته اثر تنش را بر کاهش عملکرد تعدیل کند، اما در غلظت‌های بالاتر این توانایی را از دست داده است. کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن توانسته عملکرد بیولوژیک را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری ۱۶ درصد افزایش دهد.



شکل ۱. تأثیر اثر متقابل رژیم آبیاری و نانوکود آهن بر عملکرد بیولوژیک

حروف غیر یکسان نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین میانگین‌ها براساس آزمون دانکن است.

شکل (۲) اثر متقابل رژیم آبیاری و محلول‌پاشی غلظت‌های مختلف نانوکود آهن بر عملکرد دانه را نشان داد. بیش‌ترین عملکرد دانه در برهم‌کنش رژیم آبیاری ۹۰ درصد همراه با کاربرد محلول‌پاشی غلظت ۸ در هزار نانوکود آهن (۶/۹۳ تن در هکتار) بود که نسبت به شاهد (عدم کاربرد نانوکود با همین رژیم آبیاری) ۹ درصد افزایش عملکرد دانه داشت. کم‌ترین عملکرد در عدم کاربرد نانوکود آهن و رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (۵/۳۸ تن در هکتار) مشاهده شد. کاربرد نانوکود آهن در شرایط کم‌آبی تا غلظت ۴ در هزار توانسته اثر کم‌آبیاری بر کاهش عملکرد را تعدیل کند، اما در غلظت‌های بالاتر این توانایی کاهش یافت. کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن توانسته عملکرد دانه را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری ۱۷ درصد افزایش دهد.



شکل ۲. تأثیر اثر متقابل رژیم آبیاری و نانوکود آهن بر عملکرد دانه.

حروف غیر یکسان نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین میانگین‌ها براساس آزمون دانکن است.

۵. بحث

۵. ۱. صفات کیفی و فیزیولوژیک

بیان شده که تنش کم‌آبی، شاخص سطح برگ و تبادلات گازی گیاه کلزا را تحت تأثیر قرار داده و با کاهش صفات فیزیولوژیک نظیر سرعت فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، هدایت مزوفیلی، سرعت تعرق و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن زیر اتاقک روزنه و درنهایت باعث کاهش عملکرد دانه در کلزا گردیده است. اما محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید و عناصر ریزمغذی (آهن+روی+منگنز) توانست ضمن کاهش معنی‌دار غلظت دی‌اکسیدکربن زیر اتاقک روزنه، با افزایش معنی‌دار شاخص سطح برگ، هدایت مزوفیلی، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و سرعت فتوسنتز تا حدی اثرات منفی تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک گیاه کلزا را کاهش دهد (میر و همکاران، ۱۴۰۰). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

تنش کم‌آبی باعث کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه سورگوم شیرین در پژوهش حاضر گردید، به‌طوری‌که مقدار کاروتنوئید و کلروفیل b در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۱۹ درصد و ۸/۹ درصد کاهش یافته نسبت به رژیم آبیاری ۹۰ درصد ظرفیت زراعی که کاربرد کود نانوکلات آهن باعث تعدیل اثرات منفی کم‌آبیاری گردید، به این طریق که کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن میزان کاهش کاروتنوئید را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی از ۱۹ درصد به ۰/۳ درصد رساند و میزان کاهش کلرفیل b را برطرف و حتی مقدار آن را نسبت به رژیم آبیاری ۹۰ درصد ظرفیت زراعی (بدون کاربرد نانوکود اهن) ۱۰/۸ درصد افزایش داد. بنابراین کاربرد نانوکود کلات آهن باعث تعدیل اثر تنش کم‌آبی شد. آهن در تشکیل کلروفیل در گیاهان نقش مؤثری دارد (راوی[1] و همکاران، ۲۰۰۸). محلول‌پاشی عناصر آهن و روی موجب افزایش محتوای کلروفیل در برنج گردید (زاید[2] و همکاران، ۲۰۱۱). کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی می‌تواند به‌طورعمده به‌دلیل تخریب ساختمان کلروپلاست و دستگاه فتوسنتزی، فتواکسیداسیون کلروفیل‌ها، واکنش آن‌ها با اکسیژن منفرد، تخریب پیش ماده‌های سنتز کلروفیل و ممانعت از بیوسنتز کلروفیل‌های جدید و فعال‌شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل، از جمله کلروفیلاز باشد (الطیب[3]، ۲۰۰۵) علاوه بر این، تنش خشکی به‌دلیل اختلال در جذب برخی عناصر ضروری نظیر آهن و روی که در سنتز کلروفیل و رنگدانه‌های آن ضروری می‌باشند موجب کاهش محتوای کلروفیل می‌گردد. در بررسی اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و اسیدفولیک در شرایط تنش بر ویژگی‌های کنجد گزارش شد که تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار برخی صفات فیزیولوژیک از جمله رنگیزه‌های فتوسنتزی شد. از طرف دیگر، محلول‌پاشی تلفیقی نانوکلات آهن و اسیدفولیک باعث بهبود میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شد که این امر در شرایط تنش بیانگر تعدیل اثر منفی ناشی از تنش خشکی بود (ایوبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

۵. ۲. عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت

نتایج پژوهش حاضر نشان داد تنش کم‌آبی باعث کاهش عملکرد دانه و بیولوژیک و هم‌چنین کاهش شاخص برداشت شد، اما کاربرد نانوکود کلات آهن اثر منفی تنش را در عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه کاهش داد. از جمله نقش‌های مثبت آهن، افزایش میزان تولید کلروفیل و نمو کلروپلاست و در نتیجه آن افزایش میزان فتوسنتز و تولید کربوهیدرات می‌باشد که در نتیجه بالارفتن میزان مواد فتوسنتزی شرایط بهتری برای رشدونمو گیاه فراهم می‌شود (یاسن[4] و همکاران، ۲۰۱۰). در بررسی اثر

1. Ravi
2. Zayed
3. El Tayeb
4. Yassen

محلول‌پاشی نانوکلات آهن و منگنز بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت شرایط تنش، تنش خشکی عملکرد گندم را کاهش داد و کاربرد کود نانوآهن به همراه منگنز اثرات منفی ناشی از تنش خشکی را کاهش داد (علی‌پور و زاهدی، ۱۳۹۷). در بررسی اثر محلول‌پاشی کود نانوکلات آهن خضرا و منگنز بر کاهش اثرات کمبود آب و عملکرد کمی و کیفی ذرت دانه‌ای هیبرید ۷۰۴، نتایج نشان داد که عوارض جانبی ناشی از کمبود آب با محلول‌پاشی آهن و منگنز کاهش یافت (نجفی‌فر و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج پژوهش حاضر با این یافته‌های پژوهشی همسویی دارد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج این پژوهش، کاربرد نانوکلات آهن خضرا باعث تعدیل اثر تنش کم‌آبی بر صفات عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، رنگیزه‌های کلرفیل b و کاروتنوئید، سرعت تعرق و هدایت مزوفیلی شد. کاربرد ۴ در هزار نانوکود آهن توانسته عملکرد بیولوژیک را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری، ۱۶ درصد و عملکرد دانه را در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نسبت به عدم کاربرد نانوکود آهن در همین رژیم آبیاری، ۱۷ درصد افزایش دهد. در مجموع با مقایسه میانگین کلیه ترکیبات تیماری دو جانبه، بین اثر محلول‌پاشی ۴ در هزار و ۶ در هزار نانوکلات آهن در رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بر اکثر صفات مورد ارزیابی تفاوت معنی‌دار نبود. می‌توان گفت درصورت وجود محدودیت منابع آب آبیاری در منطقه و کاهش هزینه کود مصرفی، رژیم آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و محلول‌پاشی ۴ در هزار نانوکود آهن خضرا به سبب بهبود عملکرد سورگوم شیرین با افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش فتوسنتز در شرایط منطقه قابل‌توصیه است.

۷. تشکر و قدردانی

از دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان بابت همکاری‌های بی‌دریغ، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

ایوبی زاده، نیکی؛ لایی، قنبر؛ امینی دهقی، مجید؛ مسعود سینکی، جعفر و رضوان، شهرام (۱۳۹۷). اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و اسیدفولیک بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیک ارقام کنجد در شرایط تنش خشکی. *فصلنامه علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز*، ۱۰ (۴۰)، ۵۵-۷۵.

پرداختی، علیرضا؛ نظران، محمد حسن؛ حکم‌آبادی، حسین و آشتیانی، محمد (۱۳۸۵). نقش فضای سبز در کاهش آلودگی هوا و اثر کود جدید کلات آهن خضرا در افزایش کارایی گیاهان و تلطیف هوا. *اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست*.

خزائی، عظیم؛ گلزردی، فرید؛ بغدادی، امیر صالح و سوری، حسن (۱۳۹۷). تأثیر تنش خشکی بر عملکردِ لاین‌های امیدبخش و ارقام سورگوم دانه‌ای. *پانزدهمین کنگره ملی علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران. کرج. ایران*.

خوشحال دستجردی، جواد و جوشنی، علیرضا (۱۳۹۱). برآورد مناسب ترین شیوه محاسبه بارش مؤثر برای کشت گندم پاییزه در حوزه دریاچه نمک. *مطالعات جغرافیای مناطق خشک*، ۳ (۱۰)، ۱۵۳-۱۶۹.

علی‌پور، اگبر و زاهدی، حسین (۱۳۹۷). اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و منگنز بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) تحت تأثیر تنش خشکی. *نشریه پژوهش‌های کاربردی زراعی*، ۳۱(۱)، ۳۹-۵۱.

علیزاده، فاطمه؛ نصرالهی، علی حیدر؛ سعیدی‌نیا، مهری و شریفی پور، مجید (۱۳۹۹). تأثیر کم‌آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم (مطالعه موردی: خرم‌آباد). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۶)، ۱۴۱۷-۱۴۲۶.

مهدوی خرمی، اکرم؛ مسعود سینکی، جعفر؛ امینی دهقی، مجید؛ رضوان، شهرام و دماوندی، علی (۱۳۹۷). اثر کودهای نانو، شیمیایی و بیولوژیک بر عملکرد و کیفیت دانهٔ کنجد در رژیم های متفاوت آبیاری. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۰ (۱)، ۲۸۱-۲۶۳.

میر، یونس؛ دانشور، ماشالله و اسماعیلی، احمد (۱۴۰۰). اثر محلول‌پاشی سالیسیلیک‌اسید و عناصر ریزمغذی بر فعالیت‌های فتوسنتزی و عملکرد دانه کلزا تحت تنش کم‌آبی. *مجله علمی پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱۳ (۵۰)، ۱۱۹-۱۳۴.

نجفی‌فر، فاطمه؛ مدرس ثانوی، علی محمد و آقا علیخانی، مجید. (۱۳۹۵). *اثر محلول‌پاشی عناصر نانوکلات آهن و منگنز بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای تحت تنش کم‌آبی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۱۲ صفحه.

نصیرپور، صادق؛ جهانسوز، محمدرضا؛ احمدی، علی و افشون، اسماعیل (۱۴۰۱). تأثیر سطوح آبیاری و سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد سورگوم دانه‌ای (*Sorghum bicolor* L.). *نشریه علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۳ (۲)، ۱۹۳-۲۰۴.

References

Alipour, A., & Zahedi, H. (2018). Effect of foliar application of nano-chelated iron and manganese fertilizers on yield and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. *Applied Research in Field Crops*, 30(4), 39-51. (In Persian)

Alizadeh, F., Nasrollahi, A.H., Saeedinia, M., & Sharifipour, M. (2020). Effect of Deficit Irrigation and Different Nitrogen Levels on Wheat Yield and Water Productivity (Case Study: Khorramabad). *Iran Water and Soil Research*, 51(6), 1417-1426. (In Persian)

Alizadeh-Choobari, O., & Najafi, M.S. (2018). Extreme weatherevents in Iran under a changing climate. *Journal of Climate Dynamics*, 50, 249-260.

Arnon, D.E. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (*Beta vulgaris*). *Plant Physiology*, 24, 1-15.

Ayobizadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masood Sinaki, J., & Rezvan, S. (2019). Effect of Drought Stress and Foliar Nutrition of Iron Nano-Chelate and Fulvic Acid on Grain Yield and Fatty Acids' Composition in Seed Oil of Two Sesame Cultivars. *Scientific Research Quarterly Journal of Plant Physiology- Islamic Azad University, Ahvaz Branch*, 50, 55-75. (In Persian)

Chen, L., Yuan, X., Li, J., Dong, Z., & Shao, T. (2018). Effects of applying oil-extracted microalgae on the fermentation quality, feed-nutritive value and aerobic stability of ensiled sweet sorghum. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98, 4462-4470.

El Tayeb, M. A. (2005). Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid. *Plant Growth Regulation*, 45, 215-224

Alsanad, M. A., & Emara, E. I. R. (2024). Optimizing Bioethanol (C2H5OH) Yield of Sweet Sorghum Varieties in a Semi-Arid Environment: The Impact of Deheading and Deficit Irrigation. *Water*, 16(10), 1456. https://doi.org/10.3390/w16101456

Guo, Y., Song, Y., Zheng, H., Zhang, Y., & Sui, N. (2018). NADP-malate dehydrogenase of sweet sorghum improves salt tolerance of Arabidopsis thaliana. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 5992-6002.

Khazaei, A., Golzardi, F., Baghdadi, A., & Soori, H. (2018). Effect of drought stress on yield of promising lines and cultivars of grain sorghum. *15th national Iranian crop science congress*. Karaj, Iran. (In Persian)

Khushal Dastjardi, J., & Joshani, A.R. (2012). Estimation of the most appropriate method of calculating effective precipitation for autumn wheat cultivation in the Salt Lake area. *Geography Studies of Dry Areas*, 9 (10), 153-169. (In Persian)

Kim, J.B., & Bae, D.H. (2021). The impacts of global warming on cli-mate zone changes over Asia based on CMIP6 projections. *Journal of Earth and Space Science*, 8, e2021EA001701.

Koc, M., Barutcular, C., & Genc, I. (2003). Photosynthesis and productivity of old and modern durum wheat's in Mediterranean environment. *Crop Science*, 43, 2089-2098.

Mahdavi Khorami, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., Rezvan, S., & Damavandi, A. (2018). Effect of nano, chemical, and biological fertilizers on the yield and quality of sesame seeds under different irrigation regimes. Crops Improvement. *Journal of Agricultural Crops Production*, 20(1), 263-281. (In Persian)

Mir, Y., Daneshvar, M., & Ismaili, A. (2021). Effect of foliar application of salicylic acid and micronutrients on photosynthetic activities and rapeseed grain yield under water deficit tension. *Scientific Journal of Crop Physiology I.A.U. Ahvaz*, 13(50), 119-134. (In Persian)

Najafifar, F., Modares Sanavi, S. A. M & Agha Alikhani, M. (2016). *The effect of foliar application of iron and manganese nano-chelate elements on the yield and yield components of grain corn under water deficit stress*. Master's thesis. Tarbiat Modares University. page 112. (In Persian)

Nasirpour, S., Jahansouz, M.R., Ahmadi, A., & Afshoon, E. (2022). Effect of irrigation levels and different tillage systems on grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.) yield. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 53(2), 193-204. (In Persian)

Pardakhti, A., Nazaran, M.H., Hokmabadi, H., & Ashtiani, M. (2006). The role of green space in reducing air and the effect of the new Khazra iron chelate fertilizer in increasing plant efficiency and air conditioning. *The first specialized conference on environmental engineering*. Iran. (In Persian)

Perrin, R., Fulginiti, L., Bairagi, S., & Dweikat, I. (2018). Sweet Sorghum as Feedstock in Great Plains Corn Ethanol Plants: The Role of Biofuel Policy. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 43(1), 34-45.

Rahmani, A., Mirza, M., & Tabaei Aghdai, S.R. (2013). Effects of different fertilizaers (macro and micro element) on quantity and quality of essential oil and other byproducts of Rosa domascena Mill. in Iran. *Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 29 (4), 747-759

Rao, P. S., Kumar, C. G., & Reddy, B. V. (2013). Characterization of improved sweet sorghum cultivars (pp. 1-15). Berlin: Springer.

Ravi, S., Channal, H.T., Hebsur, N.S., Patil, B.N., & Dharmatti, P.R. (2008). Effect of sulfur, zinc and iron nutrition on growth, yield, nutrient uptake and quality of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Karnataka Journal of Agricultural Science*, 21(3), 382-385.

Ritchie, S.W., Nguyen, H.T., & Holaday, A.S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop Science*, 30(1), 105-111.

Soyder, V., & Schmidt, R.E. (1974). Nitrogen and ironfertilization on bentgrass. In *Proceeding of 2nd International Turfgrass Research Conference*, VPIBlacksburg, pp: 176-185.

Sui, N., Yang, Z., Liu, M., & Wang, B. (2015). Identification and transcriptomic profiling of genes involved in increasing sugar content during salt stress in sweet sorghum leaves. *BMC Genomics*, 16, 534. Doi: 10.3389/fpls.2018.00007

Vasilakoglou, I., Dhima, K., Karagiannidis, N., & Gatsis, T. (2011). Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Research*, 120(1), 38-46.

Xie, Q., & Xu, Z. (2019). Sustainable sgriculture: from sweet sorghum planting and ensiling to ruminant feeding. *Molecular Plant*, 12, 603-606.

Yassen, A., Abou El-Nour, E.A.A., & Shedeed, S. (2010). Response of Wheat to foliar spray with urea and micronutrients. Journal of American Science, 6(9), 14-22.

Zayed, B.A., Salem, A.K.M., & El Sharkawy, H.M. (2011). Effect of different micronutrient treatments on rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield under saline soil conditions. *World Journal Agricultural Science*, 7 (2), 179-184.