



Study of Physiological, Growth, and Yield Responses of Sesame to the Application of Potassium Nano-Fertilizer, Foliar Application of Fulvic Acid and Chitosan under Drought Stress

Amir Mizani¹ | Jafar Masuod Sinaki² | Shahram Rezvan³ |
Mohammad Abedini Esfahlani⁴ | Ali Damavandi⁵

1. Agronomy Department, Damghan branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran. E-mail: amirmizani@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Agriculture, production and technology of herbal medicines research centre, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran. E-mail: sinaki@iau.ac.ir
3. Department of Agriculture, production and technology of herbal medicines research centre, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran. E-mail: sh.rezvan@iau.ac.ir
4. Filed and Horticultural Crops Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Semnan Province (Shahrood), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrood, Iran. E-mail: m.abedini@areeo.ac.ir
5. Department of Agriculture, production and technology of herbal medicines research centre, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran. E-mail: al.damavandi1347@iau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 25 September 2021

Received in revised form:

12 March 2022

Accepted: 22 March 2022

Published online:

17 December 2022

Keywords:

Antioxidant activity,
irrigation cut off,
leaf area index,
photosynthetic pigments,
seed oil .

ABSTRACT

This experiment works on the physiological, growth, and yield responses of sesame to the application of potassium nano-fertilizers, chitosan, and fulvic acid under drought stress in Semnan Agricultural and Natural Resources Research Center as a factorial split-plot based on randomized complete block design with three replications in 2019. The experimental treatments include drought as the main plot (normal irrigation, irrigation cut off in 70 and 60 BBCH as moderate, and severe stress, respectively) and potassium nano-fertilizer (0, 1.5, and 2.5 per thousand) and foliar application (control, chitosan, fulvic acid, and 50% of chitosan+ fulvic acid) as sub-plots. Application of potassium nano-fertilizer under normal and stress conditions significantly cuts chlorophyll b and total, leaf area index, number of capsules, 1000-seed weight, and oil percentage. The highest grain yield belongs to the application of 1.5 and 2.5 per thousand nano fertilizers, using fulvic acid alone or in combination with 50% chitosan (2516, 2277.5, 2506.6, and 2313.2 kg/ha, respectively). The highest oil content has been in 1.5 and 2.5 per thousand nano fertilizer application under normal irrigation, which has increased 13.2% and 15.4%, respectively. Foliar application of fulvic acid with nano potassium fertilizer (1.5 per thousand) under severe drought stress show the highest activity of antioxidant enzymes catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase, and superoxide dismutase. In general, the results show that the application of 1.5 per thousand nano potassium fertilizer and combined foliar application of chitosan and fulvic acid under severe drought by improving physiological traits, manage to modify the adverse effects of drought, increasing growth, yield, and quality indices of sesame.

Cite this article: Mizani, A., Sinaki, J. M., Rezvan, Sh., Abedini Esfahlani, M., & Damavandi, A. (2022). Study of Physiological, Growth, and Yield Responses of Sesame to the Application of Potassium Nano-Fertilizer, Foliar Application of Fulvic Acid and Chitosan under Drought Stress. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1161-1178.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.331235.2618>





مطالعه پاسخ‌های فیزیولوژیک، رشدی و عملکرد کنگد به کاربرد نانوکود پتاسیم، محلول‌پاشی فولویک‌اسید و کیتوزان تحت تنش خشکی

امیر میزانی^۱ | جعفر مسعود سینکی^۲ | شهرام رضوان^۳ | محمد عابدینی اسفهلانی^۴ | علی دماوندی^۵

۱. گروه زراعت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: amirmizani@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، گروه کشاورزی مرکز تحقیقات تولید و فناوری داروهای گیاهی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: sinaki@iauo.ac.ir
۳. گروه کشاورزی مرکز تحقیقات تولید و فناوری داروهای گیاهی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: sh.rezvan@iauo.ac.ir
۴. بخش تحقیقات زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران. رایانامه: m.abedini@areeo.ac.ir
۵. گروه کشاورزی مرکز تحقیقات تولید و فناوری داروهای گیاهی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: al.damavandi1347@iauo.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

کلیدواژه‌ها:

رنگبزه‌های فتوسنتزی،

روغن دانه،

شاخص سطح برگ،

فعالیت آنتی‌اکسیدانی،

قطع آبیاری.

پژوهش حاضر با هدف مطالعه پاسخ‌های فیزیولوژیک، رشدی و عملکرد کنگد به کاربرد نانوکود پتاسیم، کیتوزان و فولویک‌اسید تحت تنش خشکی، در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سمنان به صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۳۹۸ اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل، خشکی به‌عنوان عامل اصلی (آبیاری کامل، قطع آبیاری در ۷۰B BCH و ۶۰ به‌ترتیب تنش متوسط و شدید) و نانوکود پتاسیم (صفر، ۱/۵ و ۲/۵ در هزار) و محلول‌پاشی (شاهد، کیتوزان، فولویک‌اسید و ۵۰ درصد کیتوزان + فولویک‌اسید) به‌عنوان عامل فرعی بودند. استفاده از نانوکود پتاسیم تحت شرایط نرمال و تنش، افزایش معنی‌دار کلروفیل b و کل، شاخص سطح برگ، تعداد کیسول، وزن هزاردانه و درصد روغن را در پی داشت. بیش‌ترین عملکرد دانه در کاربرد ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود به‌همراه فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با کیتوزان (به‌ترتیب ۲۵۱۶، ۲۲۷۷/۵، ۲۵۰۶/۶ و ۲۳۱۳/۲ کیلوگرم در هکتار) بود. بالاترین محتوای روغن در کاربرد ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود تحت شرایط آبیاری نرمال بود که افزایش ۱۳/۲ و ۱۵/۴ درصدی داشتند. محلول‌پاشی فولویک‌اسید به‌همراه نانوکود پتاسیم (۱/۵ در هزار) تحت تنش شدید خشکی بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز را نشان داد. به‌طورکلی، نتایج نشان داد که کاربرد ۱/۵ در هزار نانوپتاسیم و محلول‌پاشی تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید تحت تنش خشکی شدید، با بهبود صفات فیزیولوژیک منجر به تعدیل اثرات منفی ناشی از خشکی و افزایش شاخص‌های رشدی، عملکردی و کیفی کنگد شد.

استناد: میزانی، ا.، سینکی، ج. م.، رضوان، ش.، عابدینی اسفهلانی، م. و دماوندی، ع. (۱۴۰۱). مطالعه پاسخ‌های فیزیولوژیک، رشدی و عملکرد کنگد به کاربرد نانوکود پتاسیم، محلول‌پاشی فولویک‌اسید و کیتوزان تحت تنش خشکی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۴)، ۱۱۶۱-۱۱۷۸.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.331235.2618>



۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد کمی و کیفی گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب یا تنش خشکی است (Salamati & Danaie, 2020). کشت گیاهان متحمل به خشکی و همچنین افزایش شاخص‌های تحمل به تنش توسط عملیات به‌زراعی هم‌چون تغذیه کودی مناسب، مدیریت آبیاری و غیره می‌تواند در افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاهان تحت شرایط تنش خشکی مؤثر واقع شود (Mahdavi Khorami et al., 2020).

کنجد با نام علمی *Sesamum indicum* L. یکی از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی مورد کشت است که تحمل مطلوبی تحت تنش کمبود آب دارد. بالابودن تحمل در برابر خشکی از مزایای برتری این گیاه بوده که قابلیت کشت آن را در مناطق نسبتاً خشک با تولید عملکرد دانه و روغن بالا امکان‌پذیر می‌سازد (Kouighat et al., 2021). این گیاه به دلیل بالابودن محتوای پروتئین دانه (۱۸-۲۵ درصد)، روغن دانه (۴۵-۶۲ درصد) و کربوهیدرات (حدود ۱۳/۵ درصد) جایگاه ویژه‌ای در بین گیاهان دانه روغنی دارد و به‌عنوان ملکه دانه‌های روغنی شناخته می‌شود (Asadi et al., 2020). کنگد یک محصول ویژه مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری است، اما در شرایط آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک نیز کشت می‌شود (Arslan et al., 2018). در سال ۲۰۲۰، سطح زیر کشت کنگد حدود ۱۲/۸۲ میلیون هکتار با تولید جهانی حدود ۶/۵۵ میلیون تن بود که حدود ۶۰ درصد آن از آسیا تأمین شده است (Kouighat et al., 2021). براساس آخرین آمارنامه جهاد کشاورزی، کنگد در ایران، سطح زیر کشت ۵۱۶۱۰ هکتار، تولید ۴۲۸۵۳ تن و میانگین عملکرد ۱۱۸۸ کیلوگرم در هکتار دارد (Statistical Center of Ministry of Agriculture Jihad, 2020).

تنش خشکی شدید یا طولانی‌مدت با کاهش تعداد کپسول در بوته، عملکرد و کیفیت روغن، بر عملکرد کنگد تأثیر منفی می‌گذارد (Khordadi-Varamin et al., 2020). تنش خشکی همچنین می‌تواند سطح متابولیت‌های ثانویه و ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک دانه کنگد را تحت تأثیر قرار دهد (Kermani et al., 2019). گیاهان مکانیسم‌های مختلفی برای مقابله با وقوع شرایط محدودیت آبی ایجاد می‌کنند (Pourghasemian et al., 2020). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان داد که تنش خشکی به‌طور کلی منجر به تخریب کلروپلاست‌ها و کاهش محتوای کلروفیل و فعالیت آنزیم‌ها در چرخه کالوین در طول فرایند فتوسنتز می‌شود (Sharma et al., 2020). بررسی منابع نشان داد که کم‌آبیاری یا تنش خشکی محتوای پرولین آزاد، قندهای کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده، اما محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، عملکرد دانه، درصد و عملکرد روغن گیاه کنگد در شرایط تنش خشکی کاهش یافته است (Ayoubizadeh et al., 2020; Mahdavi Khorami et al., 2020).

علاوه بر این، تنش خشکی منجر به عدم تعادل در جذب مواد مغذی از خاک می‌شود و تغذیه گیاه در چنین شرایطی بسیار مهم است. از راه‌کارهای دیگر افزایش شاخص‌های تحمل خشکی، تغذیه کودی گیاهان با استفاده از منابع و غلظت‌های مناسب است (Khordadi-Varamin et al., 2020). در بین عناصر ضروری گیاهان، پتاسیم نقش قابل‌توجهی در بقای گیاهان تحت تنش‌های محیطی ایفا می‌نماید. این عنصر، با افزایش رشد و بهبود صفات فیزیولوژیک منجر به بهبود عملکرد و کیفیت محصول شده و همچنین تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی از جمله خشکی را افزایش می‌دهد (Barat Zadeh & Babaei Nejad, 2019). نانوکودها از منابع جدید کودی هستند که منجر به کاهش سمیت خاک و کاهش مصرف کودهای شیمیایی شده و به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه کمک شایانی می‌نماید (Mahdavi et al., 2018). به‌طور کلی نانوکودها، هر محصولی کودی است که از طریق نانوذره یا استفاده از نانو تکنولوژی درست شده باشد. بر این اساس، سه دسته نانوکود قابل شناسایی است؛

کود در مقیاس نانو، کود حاوی نانوذره و کود پوشش داده با مواد نانو (Mikkelsen, 2018). استفاده از نانوکود پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی منجر به افزایش عملکرد دانه ذرت (Aqaei et al., 2020)، کنجد (Mahdavi Khorami et al., 2020) و سورگوم (Kazemi et al., 2021) شده است.

فولویک‌اسید از ترکیبات هوموسی است که از طریق کلات‌کردن عناصر ضروری موجب افزایش جذب عناصر و حاصلخیزی خاک می‌شوند (Poudineh et al., 2015). براساس نظر پژوهش‌گران در اثر کاربرد ترکیبات هوموسی همچون فولویک‌اسید و هیومیک، اثرات منفی ناشی از تنش‌های محیطی از جمله خشکی را کاهش می‌دهد. در این راستا، Ayoubizadeh et al. (2020) گزارش نمودند که کاربرد فولویک‌اسید منجر به افزایش تعداد دانه، عملکرد دانه و روغن و همچنین محتوای اسیدهای چرب غیراشباع در کنجد شده است. این پژوهش‌گران بیان داشتند که مواد هوموسی نفوذپذیری غشای سلولی را تقویت کرده و با افزایش ورود مواد به داخل سلول، تقسیم سلولی، رشد و عملکرد را افزایش می‌دهند. کیتوزان ($C_{11}H_{17}O_7N_2$) یک پلی‌ساکارید پلی‌استات است که از محصولات جانبی صنایع شیلات و همچنین از پوست خرچنگ و میگو حاصل می‌شود و به‌تازگی به‌عنوان تنظیم‌کننده یا بهبوددهنده رشد گیاه به‌خصوص در برابر تنش‌های محیطی موردتوجه واقع شده است (Khordadi-Varamin et al., 2020). برخی از پژوهش‌گران معتقدند که این ماده می‌تواند فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش داده و به‌عنوان یک خنثی‌کننده رادیکال‌های آزاد اکسیژن (ROS) عمل کند (Kermani et al., 2019; Zarei et al., 2020). در مورد محلول‌پاشی کیتوزان، برخی مطالعات افزایش محتوای کلروفیل، فعالیت CAT، محتوای پروتئین محلول، کربوهیدرات‌ها و همچنین محتوای پرولین را گزارش نمودند (Sultana et al., 2017; Shehzad et al., 2020; Zarei et al., 2020; Ali et al., 2021). بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که در مورد تعیین اثرات محلول‌پاشی تلفیقی غلظت‌های مختلف نانوکود پتاسیم، نانو کیتوزان و فولویک‌اسید برای کاهش اثرات منفی ناشی از تنش خشکی در گیاه کنجد، پژوهش‌های اندکی صورت گرفته است. پژوهش حاضر با فرض این‌که این ترکیبات ممکن است تحمل به تنش خشکی کنجد را در منطقه گرم و خشک افزایش دهند، موردآزمون قرار گرفت. در نتیجه، پژوهش حاضر با هدف مطالعه پاسخ‌های فیزیولوژیک، رشدی و عملکردی کنجد به کاربرد غلظت‌های مختلف نانوکود پتاسیم، کیتوزان و فولویک‌اسید تحت تنش خشکی صورت گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) در سال ۱۳۹۸ اجرا شد. محل اجرای آزمایش با ارتفاع ۱۱۳۰ متر از سطح دریا و طول و عرض جغرافیایی 28° و 35° شرقی - 34° و 35° شمالی، آب‌وهوای خشک و معتدل دارد که میانگین درازمدت بارندگی و دما در آن به‌ترتیب 140 میلی‌متر و $17/1$ درجه سانتی‌گراد است. آزمایش مزرعه‌ای به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد که در آن، تنش خشکی به‌عنوان عامل اصلی در سه سطح آبیاری کامل (شاهد یا بدون تنش)، قطع آبیاری در $BBCH^{1} 70$ و 60 به‌ترتیب به‌عنوان تنش متوسط و شدید (آبیاری تا ابتدای تشکیل بذر در داخل کپسول و آغاز شکل‌گیری ساختار گل) در نظر گرفته شد. فاکتورهای فرعی شامل نانوکود پتاسیم در سه غلظت صفر، $1/5$ و $2/5$ در هزار و محلول‌پاشی ترکیبات کیتوزان و فولویک‌اسید در چهار سطح عدم محلول‌پاشی به‌عنوان شاهد، کیتوزان (به‌میزان 5 گرم در هکتار)، فولویک‌اسید (به‌میزان 2 کیلوگرم در هکتار) و ترکیب 50 درصد کیتوزان و فولویک‌اسید (به‌ترتیب $2/5$ گرم در هکتار و 1 کیلوگرم در هکتار) ارزیابی شدند. نانوکود پتاسیم از منبع نانوکود

خضراء دارای ۲۷ درصد پتاسیم، برای فولویک‌اسید با نام تجاری Fert Star Fulvabob Potassic (به‌ترتیب حاوی ۳۰، ۲۰ و ۴ درصد مواد ارگانیک، فولویک‌اسید و هیومیک و ازت محلول در آب) و کیتوزان نیز با نام تجاری Agro ساخت کشور چین (قطر ذرات ۲۰ نانومتر) استفاده شد.

نمونه‌گیری از خاک محل آزمایش قبل از اجرای طرح از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. براساس نتایج آنالیز خاک دو کود نیتروژن (از منبع اوره در دو مرحله ابتدای کاشت و شروع گلدهی) فسفر (از منبع فسفات پتاسیم در زمان آماده‌سازی زمین) بر مبنای ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد (Mahdavi Khorami *et al.*, 2020). عملیات آماده‌سازی زمین قبل از کشت شامل شخم پاییزه، شخم بهاره و کرت‌بندی براساس نقشه طرح صورت گرفت. کشت رقم اولتان (تهیه‌شده از شرکت پاکان بذر اصفهان) به‌صورت دستی و در اواخر خردادماه، در کرت‌هایی به اندازه ۳×۲ متر با پنج ردیف کاشت (فاصله بین بوته‌ها روی ردیف و فاصله بین ردیف‌ها به‌ترتیب ۱۰ و ۵۵ سانتی‌متر) و فاصله بلوک‌ها و کرت‌های فرعی از همدیگر به‌ترتیب دو و یک متر صورت گرفت (Zarei *et al.*, 2020). اولین آبیاری بلافاصله بعد از کاشت به‌صورت جوی و پشته‌ای انجام شد. آبیاری مزرعه تا قبل از شروع گلدهی (قبل از BBCH ۶۰) به‌صورت یکنواخت صورت گرفت. پس از آن، برای اعمال تیمارهای تنش خشکی، قطع آبیاری در زمانی که ۵۰ درصد کرت موردنظر در ابتدای تشکیل بذر در داخل کپسول (برای اعمال تیمار تنش متوسط) و یا ۵۰ درصد آغاز شکل‌گیری ساختار گل (برای اعمال تیمار تنش شدید) بودند، انجام شد. برای تعیین زمان آبیاری از تشتک تبخیر کلاس A پس از تبخیر در ۷۰ میلی‌متر از تشتک استفاده شد (Mahdavi Khorami *et al.*, 2020). محلول پاشی کودهای نانوپتاسیم، فولویک‌اسید و کیتوزان در دو مرحله قبل از مرحله گلدهی و قبل از دانه‌بندی (Mahdavi *et al.*, 2018) به‌صورت جداگانه با غلظت‌های و منابع ذکرشده، صورت گرفت.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش قبل از اجرا (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک)

بافت خاک	pH	شوری (dS.m ⁻¹)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (mg.kg ⁻¹)	فسفر (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم (mg.kg ⁻¹)	آهن (mg.kg ⁻¹)
لوم رسی شنی	۷/۹۸	۲/۰۴	۱/۰۶	۱۰۵۸	۱۴/۲۳	۳۴۲/۳	۵/۲

قبل از زردرنگ‌شدن برگ‌ها و بعد از اعمال تیمارهای خشکی و محلول پاشی (۷۵BBCH)، نمونه‌گیری از برگ‌های جوان به‌منظور اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک از ۱۰ بوته به‌تصادف از هر کرت و انتقال آن به ازت مایع و در نهایت نگهداری در فریزر ۸۰- درجه سانتی‌گراد، صورت گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی از جمله کلروفیل a، b و کل از روش Arnon (1949)، پرولین از روش Bates *et al.* (1973)، کاتالاز از روش Chance & Maehly (1955)، پراکسیداز از روش Wendel (1981)، پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) از روش Gonzalez *et al.* (1999) و سوپراکسید دیسموتاز (SOD) از روش Beauchamp & Fridovich (1971) استفاده شد.

نمونه‌گیری به‌منظور اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک و اجزای عملکرد بعد از رسیدگی فیزیولوژیک که نشانه این مرحله رنگ متمایل به زرد بوته‌ها است (آبان‌ماه) با رعایت اثر حاشیه‌ای و به‌صورت تصادفی از پنج بوته از هر کرت انجام شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی در هر بوته، شاخص سطح برگ (مدل Leaf area meter, Delta-T، کشور انگلستان)، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول و وزن هزاردانه (با استفاده از ترازویی با دقت ۰/۰۱) اندازه‌گیری شد (Mahdavi *et al.*, 2018). یک مترمربع از هر کرت آزمایشی پس از حذف حاشیه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد دانه (اقتصادی) برداشت شد. پس از خشک‌شدن بوته‌ها (هوا

خشک)، دانه‌ها پاک و وزن آن‌ها با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد (Zarei *et al.*, 2020). به‌منظور اندازه‌گیری محتوای روغن دانه، ۱۰۰ گرم بذر از هر کرت آزمایشی در زمان رسیدگی زراعی برداشت شد. تعیین میزان روغن دانه با استفاده از روش استخراج گرم ASOC ((Official Method 972.28 (41.1.22) و دستگاه سوکسله (مدل ۱۳۹۰a، کشور ایران) صورت گرفت. اندازه‌گیری پروتئین دانه با استفاده از روش Bradford (1976) انجام شد. برای محاسبه عملکرد پروتئین و روغن نیز درصد پروتئین و روغن در عملکرد دانه ضرب شد (Zarei *et al.*, 2020). برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌صورت آزمایش اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، ابتدا نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab (نسخه ۱۹) ارزیابی و آزمون همگنی واریانس‌ها روی داده‌ها انجام شد. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۲) صورت گرفت. میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون مقایسه میانگین حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. صفات فیزیولوژیک

نتایج تجزیه داده‌ها نشان داد که اثر تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی ترکیبات کیتوزان و فولویک‌اسید بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b و کل معنی‌دار بودند. همچنین، اثر متقابل تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی بر محتوای کلروفیل a و اثر متقابل دوگانه تنش خشکی و نانوکود پتاسیم بر کلروفیل b و کل معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۲). کاربرد ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه کیتوزان تحت شرایط بدون تنش منجر به ایجاد بالاترین محتوای کلروفیل a با میانگین ۱۸/۵ میکروگرم در گرم وزن تر شد که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش ۳۱/۳ درصدی داشت. عدم کاربرد نانوکود پتاسیم و در تیمار بدون محلول‌پاشی تحت شرایط تنش شدید خشکی، کم‌ترین میانگین این صفت را نشان داد (جدول ۳). در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و نانوکود پتاسیم، بالاترین محتوای کلروفیل b و کل مربوط به کاربرد ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت شرایط بدون تنش خشکی بود که به‌ترتیب افزایش ۱۳/۷۴ و ۱۴/۱۶ درصدی در کلروفیل b و ۱۰/۷۸ و ۱۴/۷۰ درصدی در کلروفیل کل در مقایسه با تیمار شاهد داشتند. مطالعات قبلی نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش قابل‌توجه محتوای کلروفیل برگ می‌شود (Mahdavi Khorami *et al.*, 2020; Zarei *et al.*, 2020). در شرایط تنش خشکی، کاهش میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی یک علامت رایج است که به‌طور عمده ناشی از آسیب به کلروپلاست‌ها ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن است (Sharma *et al.*, 2020).

تحت شرایط تنش خشکی شدید، کاربرد هر دو سطح نانوکود پتاسیم در مقایسه با عدم کاربرد آن، افزایش معنی‌دار در میانگین کلروفیل b و کل را نشان داد. این افزایش در مورد کلروفیل کل ۲۵/۲۱ و ۲۱/۸ درصد به‌ترتیب در سطح ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌دست آمد (شکل ۱-A, B). به‌نظر می‌رسد که وابستگی رابطه آب در سلول‌های گیاهی به یون پتاسیم، منجر به نقش بارز نانوکود پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی است. در شرایط کمبود آب، این یون با افزایش گنجایش و حفظ آب توسط سلول‌های گیاهی، تنش وارده به سلول‌های گیاهی را تعدیل می‌نماید و باعث بهبود پتانسیل اسمزی و افزایش فشار سلولی و بزرگ سلول می‌شود (Saedi *et al.*, 2020). هم‌راستا با یافته‌های پژوهش حاضر، نتایج مشابهی در کنبج (Mahdavi Khorami *et al.*, 2020) و نعنای فلفلی (Saedi *et al.*, 2020) مشاهده شد. استفاده از کیتوزان به‌همراه ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم برترین

ترکیب تیماری در اثر متقابل نانوکود و محلول‌پاشی از نظر محتوای کلروفیل b بود (با میانگین ۱۱/۰۵ میکروگرم بر گرم وزن تر) که افزایش ۴۱/۵۳ درصدی داشت (داده‌ها ارائه نشده است). از بین فاکتورهای مورد آزمایش، اثر اصلی تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی ترکیبات کیتوزان و فولویک‌اسید بر محتوای اسیدآمینه پرولین معنی‌دار بودند، اما اثرات متقابل این عوامل غیرمعنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۲). خشکی منجر به افزایش معنی‌دار پرولین شد به‌طوری که تحت تنش شدید خشکی افزایش ۱۳/۰۹ درصدی در مقایسه با آبیاری نرمال داشت (جدول ۴).

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید بر برخی صفات فیزیولوژیک، عملکردی و کیفی گیاه کنگد تحت تنش خشکی

میانگین مربعات (MS)									درجه آزادی	منابع تغییرات
SOD	APX	PPO	POD	CAT	Proline	Total Chl	Chl-b	Chl-a		
۱/۵۶ ns	۱۴/۹۹ ns	۰/۰۲ ns	۰/۴۶ ns	۰/۵۴ ns	۰/۰۲۹ ns	۲/۴۲ ns	۱/۳۹ ns	۰/۵۰ ns	۲	تکرار
۳۱/۸**	۱۶۳۵/۹**	۱/۳۷**	۷۵۰/۹**	۸۷/۱**	۰/۱۱**	۳۷۵/۲**	۸۴/۸**	۱۳۶/۱**	۲	تنش خشکی (D)
۱/۶۷	۲۳/۶	۰/۰۰۸	۰/۸۱	۰/۲۵	۰/۰۰۲	۴/۰۵	۲/۰۱	۳/۲۸	۴	تکرار (تنش)
۱۴/۵**	۲۵۵/۳**	۰/۰۵۹**	۱۰۹/۸**	۶/۸۴**	۰/۱۰۱**	۳۰۹/۱**	۸۴/۸**	۷۲/۸۵**	۲	نانوکود پتاسیم (NPF)
۱/۳ ns	۲۱/۵*	۰/۰۶۹**	۷/۸۳**	۰/۱۷ ns	۰/۴۴۹**	۹۳/۶**	۶/۴۲ ns	۵۲/۸۴**	۳	محلول‌پاشی (FN)
۸/۸۶**	۱۰۶/۰**	۰/۰۰۶ ns	۲۹/۸**	۱/۳۳**	۰/۰۰۴ ns	۱۶/۳**	۸/۵۸*	۲/۵۲ ns	۴	D×NPF
۱/۴۹*	۱۷/۹**	۰/۰۰۸ ns	۲/۲۱ ns	۰/۲۲ ns	۰/۰۰۵ ns	۶/۲۲ ns	۷/۸۴*	۵/۹۵**	۶	D×FN
۱/۳۲ ns	۵/۸۳ ns	۰/۰۰۹ ns	۲/۴۸*	۰/۳۷ ns	۰/۰۰۵ ns	۱/۰ ns	۷/۶۱*	۶/۸۵**	۶	NPF×FN
۱/۴۵*	۲۴/۶**	۰/۰۱۲ ns	۳/۷۸**	۰/۵۳**	۰/۰۰۳ ns	۲/۴۹ ns	۲/۳۵ ns	۲/۰۹*	۱۲	D×NPF×FN
۰/۶۷	۵/۵۱	۰/۰۰۷	۱/۰۷	۰/۲	۰/۰۱۳	۳/۰۶	۳/۱	۱/۰۹	۶۶	خطای کل
۱۳/۵۲	۲۴/۷۷	۱۲/۶۸	۱۲/۱	۱۹/۶۲	۱۴/۷۴	۷/۹۳	۲۱/۶۹	۷/۵	-	ضریب تغییرات (%)

ns ** و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد. Chl: کلروفیل، Proline: پرولین، CAT: کاتالاز، POD: پراکسیداز، PPO: پلی فنل اکسیداز، APX: آسکوربات پراکسیداز، SOD: سوپراکسید دیسموتاز.

ادامه جدول ۲. تجزیه واریانس اثر نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید بر برخی صفات فیزیولوژیک، عملکردی و کیفی کنگد تحت تنش خشکی

میانگین مربعات (MS)									درجه آزادی	منابع تغییرات
پر ویتن دانه	روغن دانه	عملکرد دانه	وزن هزاردانه	تعداد دانه در کیسول	تعداد کیسول در پونه	شاخص سطح برگ	تعداد شاخه جانبی	ارتفاع پونه		
۱۷/۵**	۲۸/۹ ns	۴۴۶۸۶۲/۲ ns	۰/۲۹ ns	۱۵/۷ ns	۴۲/۶ ns	۰/۱۶ ns	۱۴/۱**	ns۱۹۲/۲	۲	تکرار
۴۵۹/۲**	۸۰۲/۶**	۵۹۷۳۸۳/۵**	۵/۸۸**	۱۱۳۱**	۶۱۴/۲**	۴/۲۶**	۹/۳۶**	۱۷۴۵/۳**	۲	تنش خشکی (D)
۳/۰۸	۱۴/۳	۱۷۰۴۲۰/۱	۰/۰۸	۱۳/۲	۳۹/۷	۰/۰۴	۰/۹۷	۸۸/۳	۴	تکرار (تنش)
۱۲۰/۱**	۲۶۴/۲**	۱۲۵۲۷۵۵۴**	۸/۲۸**	۱۹۵۲/۱**	۱۹۰۴/۶**	۲/۸۵**	۲/۵۸ ns	۲۶۲۸/۴**	۲	نانوکود پتاسیم (NPF)
۵۹/۲**	۲۹۷/۹**	۱۱۴۳۲۹۵۵/۸**	۶/۷۳**	۱۸۵۳/۶**	۷۳۹/۲**	۱/۵۹**	۶/۴**	۱۶۵/۸ ns	۳	محلول‌پاشی (FN)
۳۲/۲**	۲۹/۸*	۴۵۹۹۴۴/۲ ns	۲/۳۹**	۱۵/۹ ns	۲۳۲/۸*	۰/۵۴**	۶/۰۶**	۴۵/۷ ns	۴	D×NPF
۱/۷۳ ns	۱۲/۲ ns	۱۳۷۹۵۶/۶ ns	۱/۴۲**	۱۸/۵ ns	۸۲/۱ ns	۰/۳۱*	۲/۷۹*	۷۹/۹ ns	۶	D×FN
۱۰/۵**	۳/۷۴ ns	۱۲۹۲۵۵۷/۳**	۰/۹۱*	۱۱۶/۴**	۵۲/۸ ns	۰/۴۱*	۷/۵۷**	۲۹۶/۶ ns	۶	NPF×FN
۶/۸۹**	۹/۴۹ ns	۳۷۰۶۳۶/۶ ns	۰/۵۵ ns	۴۴/۶*	۸۹/۱ ns	ns۰/۰۹	۳/۲۷**	۷۱/۱ ns	۱۲	D×NPF×FN
۲/۶۹	۱۱/۷۱	۳۴۵۱/۲	۰/۳۶	۱۹/۹۱	۸۶/۹۸	۰/۱۴	۱/۱۹	۱۷۲/۵	۶۶	خطای کل
۷/۶۱	۸/۶۱	۳۳/۷۸	۱۹/۱۷	۱۲/۸۳	۲۱/۳۹	۸/۶۴	۱۴/۴۳	۱۲/۰۶	-	ضریب تغییرات (%)

ns ** و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید تحت شرایط تنش خشکی بر برخی صفات کمی و کیفی گیاه کنجد

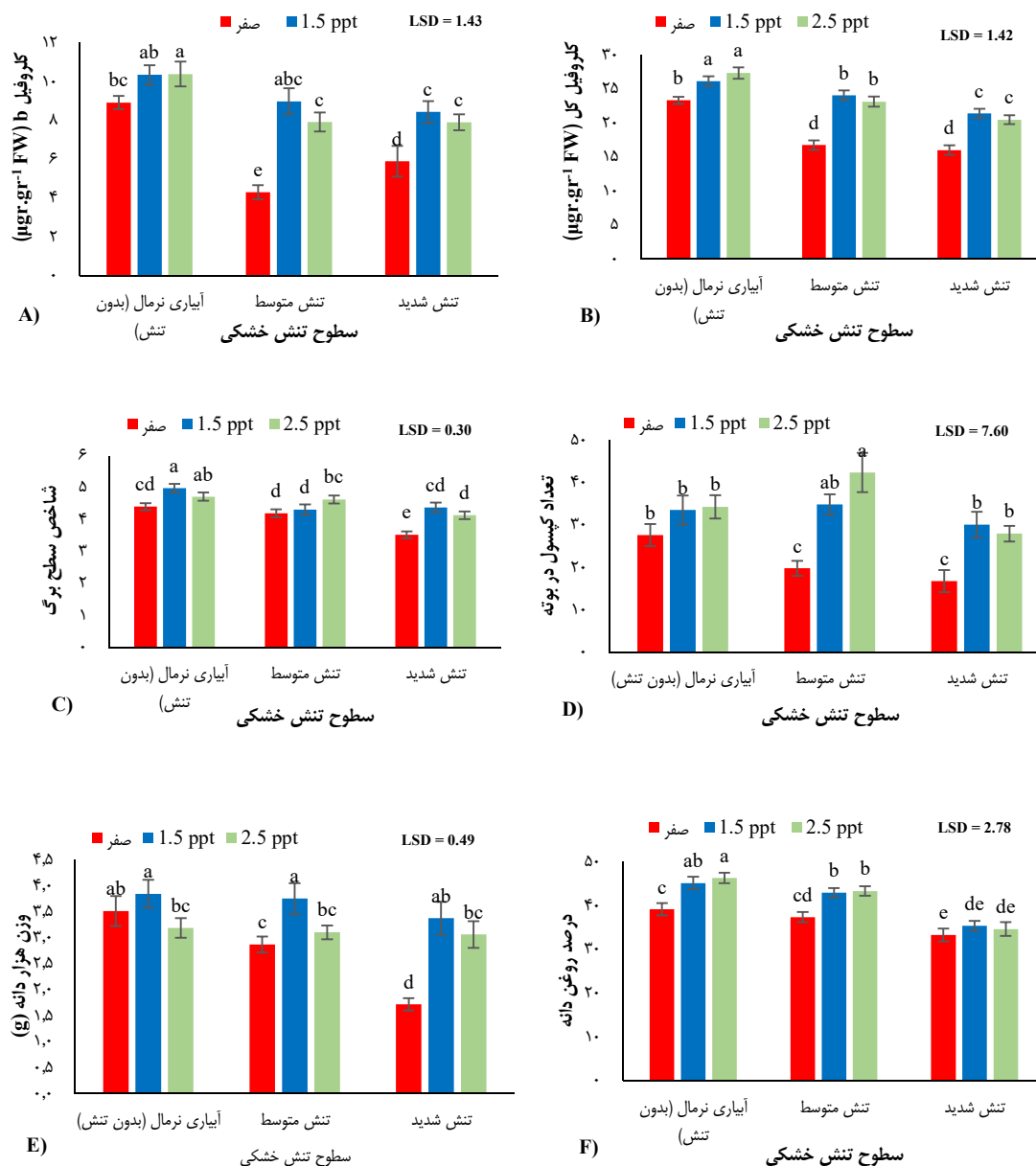
تنش خشکی	نانوکود (ppt)	محلول‌پاشی	کلروفیل a (μg/g FW)	CAT (U/mg protein.min)	POD (U/mg protein.min)	APX (U/mg protein.min)	SOD (U/mg protein)	تعداد شاخه جامبی	تعداد دانه در کپسول	درصد پروتئین دانه
آبیاری نرمال (بیون تنش)	صفر	شاهد	۱۲/۷±۱/۲ m-p	۰/۵±۰/۰۹ n	۳/۴±۰/۱ op	۲/۶±۰/۱ kl	۵/۷±۰/۸ e-i	۷/۳±۰/۶ d-h	۲۱/۲±۱ pqr	۲۱/۶±۱/۴ h-l
		CH	۱۶/۴±۰/۴ b-f	۰/۶±۰/۱ mn	۲/۹±۰/۳ p	۴/۳±۰/۹ jkl	۵/۱±۰/۱ g-j	۸±۱ c-f	۲۱/۷±۱/۱ k-n	۲۴/۲±۰/۳ d-h
		FO	۱۴/۲±۰/۹ h-m	۰/۶±۰/۱ mn	۳/۳±۰/۵ op	۴/۱±۱/۴ jkl	۶/۲±۰/۳ d-h	۷±۲ d-i	۳۳/۴±۶ z-n	۲۱/۹±۴ g-l
		CH+FO	۱۴/۳±۰/۶ h-m	۰/۶±۰/۱ mn	۲/۹±۰/۳ p	۱/۲±۰/۸ l	۵/۲±۰/۷ f-j	۸/۷±۱/۲ bcd	۳۰±۴/۵ l-o	۲۴/۷±۰/۳ d-g
۱/۵	شاهد	۱۵±۰/۴ f-j	۱/۶±۰/۲ i-l	۵/۳±۰/۸ mn	۴/۹±۲/۳ i-l	۵±۱/۵ hij	۶/۷±۱/۵ e-i	۲۷/۶±۲/۳ m-p	۲۲±۲ e-i	
	CH	۱۶/۱±۰/۵ b-g	۱/۳±۰/۳ klm	۵/۴±۰/۷ mn	۵/۹±۱/۶ jk	۵/۳±۰/۵ f-j	۸±۱ c-f	۳۷/۶±۴/۲ g-k	۲۶/۷±۰/۹ a-d	
	FO	۱۷/۵±۰/۳ ab	۱/۳±۰/۳ klm	۵/۸±۰/۸ mn	۸/۴±۱/۹ hi	۵/۱±۰/۶ g-j	۸/۳±۱/۵ b-e	۴۹/۴±۱/۵ a-d	۲۵/۳±۳/۸ cde	
	CH+FO	۱۴/۷±۰/۳ f-k	۱/۵±۰/۳ jkl	۴/۶±۰/۳ mno	۵/۲±۲/۴ ij	۵/۵±۰/۵ f-j	۱۱/۳±۱/۲ a	۴۷/۶±۲/۱ b-e	۲۸/۳±۰/۹ ab	
۲/۵	شاهد	۱۷/۱±۰/۲ abc	۰/۶±۰/۱ mn	۳/۸±۰/۷ nop	۶/۲±۱/۶ jk	۵/۱±۰/۳ g-j	۶/۷±۱/۲ e-i	۲۶/۶±۴/۵ d-n	۲۱/۳±۰/۸ i-m	
	CH	۱۸/۵±۱/۱ a	۰/۶±۰/۱ mn	۳/۳±۰/۳ op	۳/۳±۰/۳ kl	۴/۵±۰/۹ ij	۷/۷±۲/۱ c-g	۴۳±۲/۷ d-g	۲۵/۳±۰/۳ c-f	
	FO	۱۷±۱/۳ a-d	۰/۷±۰/۱ mn	۴±۰/۴ nop	۵±۱/۱ i-l	۵/۱±۰/۳ hij	۵/۱±۰/۵ e-i	۵۵/۷±۹ a	۲۲/۹±۲/۶ e-j	
	CH+FO	۱۵/۲±۰/۸ e-i	۰/۹±۰/۱ lmn	۳/۳±۰/۴ op	۴±۱/۱ jkl	۴/۷±۱/۳ ij	۷/۳±۰/۶ d-h	۵۲/۶±۴/۷ ab	۲۴/۷±۰/۸ d-g	
صفر	شاهد	۱۰/۶±۰/۴ qr	۱/۹±۰/۲ g-k	۸/۶±۰/۵ i-l	۴/۷±۲/۴ i-l	۴/۶±۰/۵ ij	۶/۷±۱/۲ e-i	۱۷±۲/۲ rs	۲۰±۱/۶ k-o	
	CH	۱۴/۸±۰/۶ f-j	۱/۶±۰/۴ jkl	۷/۵±۰/۵ l	۴/۱±۱/۱ jkl	۴/۱±۰/۶ j	۸/۷±۱/۲ bcd	۳۱/۲±۴/۸ k-n	۲۲/۵±۱/۳ f-k	
	FO	۱۱/۵±۱ pqr	۱/۷±۰/۴ h-l	۸/۴±۰/۳ jkl	۲/۷±۱/۸ kl	۴/۱±۰/۶ j	۵/۳±۱/۲ i	۵۳/۴±۶/۲ j-m	۲۰/۱±۰/۸ k-o	
	CH+FO	۱۲/۸±۰/۲ l-p	۱/۸±۰/۲ g-k	۷/۸±۰/۴ l	۵/۹±۲/۶ jk	۴/۹±۰/۶ hij	۴/۹±۰/۶ bc	۳۳/۲±۶/۸ j-n	۲۱/۸±۰/۷ h-l	
تنش متوسط	شاهد	۱۲±۱/۶ n-q	۲/۲±۰/۳ f-j	۹/۱±۰/۷ h-l	۱۹/۴±۰/۴ bc	۷/۷±۰/۸ bc	۷±۱ d-i	۳۴/۴±۵ j-m	۲۵/۵±۲ b-e	
	CH	۱۵/۴±۱/۸ d-i	۲/۱±۰/۳ f-j	۸/۹±۰/۶ h-l	۱۱/۱±۳/۹ gh	۶/۹±۰ b-e	۸±۱/۷ c-f	۳۵/۸±۱/۲ h-l	۲۸/۴±۰/۶ a	
	FO	۱۶/۷±۱/۹ b-e	۲±۰/۵ f-k	۹/۲±۱/۲ h-l	۷/۷±۲ hij	۶/۵±۰/۲ c-f	۶/۷±۰/۶ e-i	۵۳±۶/۴ a-d	۲۶/۱±۲/۱ a-d	
	CH+FO	۱۶/۳±۱/۷ b-f	۲/۴±۰/۲ fgh	۹/۷±۰/۴ g-j	۱۲/۴±۵/۳ fg	۸/۲±۰/۶ ab	۹/۳±۰/۶ bc	۴۴/۹±۶/۶ c-f	۲۷/۶±۱/۱ abc	
۲/۵	شاهد	۱۳±۱/۱ k-p	۲/۴±۰/۳ fgh	۸/۸±۰/۹ i-l	۳/۳±۰/۶ kl	۵/۷±۱/۱ e-i	۱±۱ ab	۳۴/۱±۵/۹ j-m	۲۰/۱±۱/۸ k-o	
	CH	۱۷/۷±۱/۱ ab	۲/۲±۰/۶ f-j	۷/۸±۰/۵ l	۲/۵±۱/۷ kl	۶/۳±۰/۵ c-h	۸/۷±۱/۲ bcd	۴۲/۶±۳/۴ d-h	۲۲/۱±۱/۲ g-l	
	FO	۱۴/۵±۱/۳ g-l	۲/۶±۰/۳ efg	۸/۵±۱ jkl	۳/۴±۱/۲ kl	۶/۳±۰/۹ d-h	۹/۳±۱/۵ bc	۵۱/۷±۳/۲ abc	۲۰/۵±۳/۲ i-n	
	CH+FO	۱۵/۶±۱/۶ c-h	۲/۴±۰/۳ f-i	۸±۰/۸ kl	۲/۵±۰/۷ kl	۶/۶±۰/۵ c-f	۶/۳±۱/۲ f-i	۴۳/۶±۸/۶ d-g	۲۱/۹±۱/۵ h-l	

ادامه جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید تحت شرایط تنش خشکی بر برخی صفات کمی و کیفی گیاه کنجد

تنش خشکی	نانوکود (ppt)	محلول‌پاشی	کلروفیل a (μg/g FW)	CAT (U/mg protein.min)	POD (U/mg protein.min)	APX (U/mg protein.min)	SOD (U/mg protein)	تعداد شاخه جامبی	تعداد دانه در کپسول	درصد پروتئین دانه
صفر	شاهد	۱۱/۹±۰/۵ opq	۲/۸±۰/۳ ef	۹/۹±۰/۹ g-j	۱۵±۲/۴ def	۵/۶±۰/۸ e-i	۷/۳±۱/۸ bcd	۱۳/۱±۱/۶ s	۱۴/۴±۰/۶ rs	
	CH	۱۱/۸±۰/۸ opq	۴/۳±۰/۷ abc	۱۲/۴±۰/۲ de	۱۹±۳ bc	۷/۵±۰/۴ bcd	۶/۷±۰/۶ e-i	۲۷/۷±۰/۳ m-p	۱۴/۷±۲/۵ qrs	
	FO	۱۰±۱/۶ r	۲/۴±۰/۳ fgh	۱۰±۰/۸ efg	۱۹/۸±۲/۱ b	۶/۳±۱/۲ d-h	۵/۷±۱/۲ hi	۳۳/۹±۲/۷ o-r	۱۶/۳±۱/۷ pqr	
	CH+FO	۱۰/۸±۰/۹ qr	۲/۷±۰/۶ cd	۲۰±۰/۶ a	۱۸/۷±۱/۲ bcd	۱۹/۸±۲/۱ b	۹/۵±۱/۳ a	۳۳/۹±۲/۷ o-r	۱۶/۳±۱/۷ pqr	
تنش شدید	شاهد	۱۳/۷±۱ i-n	۴/۳±۰/۵ abc	۱۵/۸±۰/۷ b	۱۸/۲±۳/۲ b-c	۷/۴±۰/۲ bcd	۶±۱ ghi	۲۱/۲±۰/۷ pqr	۱۹/۶±۲/۶ l-o	
	CH	۱۴±۱/۳ h-m	۴/۹±۱/۷ a	۱۸/۵±۴/۵ a	۲۱/۴±۷ ab	۸/۲±۱/۹ ab	۷±۱/۷ d-i	۳۹/۹±۳/۳ f-j	۱۷/۸±۱/۱ nop	
	FO	۱۳/۳±۱/۱ j-o	۴/۴±۰/۵ abc	۱۴/۳±۱/۲ bc	۱۴/۶±۴/۸ efg	۶/۲±۱ d-h	۸±۱ c-f	۳۵±۴/۶ i-l	۲۲/۴±۰/۳ g-l	
	CH+FO	۱۱/۴±۰/۷ pqr	۴/۷±۰/۳ a	۱۰/۲±۰ ghi	۱۲/۴±۰/۶ fg	۶/۱±۰/۹ d-h	۷/۷±۱/۲ c-g	۱۴/۱±۳/۱ s	۲۰/۱±۱/۳ j-o	
۲/۵	شاهد	۱۴/۵±۱/۷ g-l	۴/۷±۰/۳ a	۱۰/۵±۱/۳ fgh	۱۳±۳/۹ fg	۶/۹±۰/۸ b-e	۷/۳±۱/۵ d-h	۳۶/۷±۰/۹ g-l	۱۸/۵±۲/۱ nop	
	CH	۱۳/۷±۱/۴ i-m	۳/۸±۱ bcd	۹/۷±۱/۳ g-k	۱۴/۱±۴/۳ fg	۶/۵±۱/۵ c-g	۷/۷±۱/۵ c-g	۴۱/۷±۴/۶ e-i	۱۸/۶±۰/۶ m-p	
	FO	۱۰/۶±۰/۹ qr	۴/۶±۰/۵ a	۱۲±۰/۹ def	۱۵/۸±۳ c-f	۶/۴±۰/۲ bcd	۸±۱/۷ c-f	۳۹/۹±۴/۲ f-j	۱۷/۴±۲/۲ opq	
	CH+FO	۱۰/۶±۰/۹ qr	۴/۶±۰/۵ a	۱۲±۰/۹ def	۱۵/۸±۳ c-f	۶/۴±۰/۲ bcd	۸±۱/۷ c-f	۳۹/۹±۴/۲ f-j	۱۷/۴±۲/۲ opq	

LSD (α=۰/۰۵) ۱/۷۰، ۰/۷۴، ۱/۶۸، ۲/۸۱، ۱/۳۴، ۱/۷۸، ۷/۲۷، ۲/۶۷

میانگین‌های (mean ± StD) دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند. کیتوزان: CH، فولویک‌اسید: FO.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و سطوح مختلف نانوکود پتاسیم بر محتوای کلروفیل b (A)، کلروفیل کل (B)، شاخص سطح برگ (C)، تعداد کیسول در بوته (D)، وزن هزاردانه (E) و درصد روغن دانه (F) کنگد.

تجمع پرولین به عنوان یکی از مهم‌ترین اسمولیت‌ها، از کلروپلاست در برابر تخریب محافظت می‌کند و در نتیجه از کاهش کلروفیل در شرایط تنش جلوگیری می‌کند. بنابراین، تجمع پرولین به‌طور مستقیم با میزان مقاومت در برابر تنش خشکی ارتباط دارد (Mwenye *et al.*, 2016). در بین غلظت‌های نانوکود پتاسیم، بیش‌ترین پرولین مربوط به عدم کاربرد نانوکود پتاسیم و کم‌ترین میانگین مربوط به غلظت‌های ۱/۵ و ۲/۵ در هزار (۰/۷۴ و ۰/۷۹ میکرومول بر گرم وزن تر) بودند (جدول ۴). از عملکردهای اسیدآمین پرولین می‌توان به حفاظت از ساختار پروتئینی و غشای سلول، تعادل اسمزی، تثبیت ساختارهای درون سلولی و مهم‌تر از همه حذف رادیکال‌های آزاد اشاره کرد. عنصر پتاسیم یک عنصر بسیار مؤثر در راه‌اندازی فعالیت بسیاری از

آنزیم‌های درون سلولی می‌باشد (Saedi *et al.*, 2020). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که محلول‌پاشی ترکیبات کیتوزان و فولویک‌اسید منجر به کاهش معنی‌دار میانگین پرولین شد، به طوری که استفاده از کیتوزان و فولویک‌اسید ضمن داشتن کم‌ترین میانگین این اسیدآمین، به ترتیب کاهش ۳۰/۲ و ۲۵ درصدی در مقایسه با شاهد داشتند (جدول ۴).

جدول ۴. اثر نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید بر برخی محتوای پرولین، فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز و ارتفاع بوته گیاه کنجد تحت تنش خشکی

ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	پلی فنل اکسیداز (U/mg protein.min)	پرولین ($\mu\text{mol/g FW}$)	
			تنش خشکی (D)
۱۱۵±۱۵/۷ a	۰/۵۸±۰/۱ b	۰/۷۳±۰/۱ c	نرمال
۱۱۰/۲±۱۳/۷ a	۰/۵۹±۰/۰۶ b	۰/۸±۰/۱۵ b	متوسط
۱۰۱/۳±۱۳ b	۰/۹۳±۰/۱۵ a	۰/۸۴±۰/۱۷a	شدید
۶/۱۴	۰/۰۶۲	۰/۰۳۱	LSD ($\alpha=۰/۰۵$)
			نانوکود پتاسیم (NPF) (قسمت در هزار)
۱۰۰/۵±۱۱/۵ c	۰/۷۲±۰/۲۲ a	۰/۸۵±۰/۱۷ a	صفر
۱۱۷/۶±۱۵/۹ a	۰/۷۳±۰/۱۹ a	۰/۷۴±۰/۱۴ b	۱/۵
۱۰۸/۵±۱۲/۸ b	۰/۶۵±۰/۱۶ b	۰/۷۹±۰/۱۷ b	۲/۵
۶/۱۸	۰/۰۴۱	۰/۰۵۴	LSD ($\alpha=۰/۰۵$)
			محلول‌پاشی (FN)
۱۱۰/۱±۱۶/۴	۰/۷۵±۰/۲۲ a	۰/۹۶±۰/۱۲ a	شاهد
۱۰۶/۴±۱۴/۸	۰/۶۴±۰/۱۴ c	۰/۶۷±۰/۱ c	کیتوزان (CH)
۱۱۱/۷±۱۶/۲	۰/۷۳±۰/۲ ab	۰/۷۲±۰/۱۲ c	فولویک‌اسید (FA)
۱۰۷/۱±۱۳/۲	۰/۶۹±۰/۲ b	۰/۸۲±۰/۱۴ b	% CH+FA۵۰
NS (۷/۱۳)	۰/۰۴۸	۰/۰۶۳	LSD ($\alpha=۰/۰۵$)

ns: غیر معنی‌دار و * معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد؛ میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند. Proline: پرولین، PPO: پلی فنل اکسیداز.

تنش خشکی و نانوکود پتاسیم اثر معنی‌داری بر میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز داشتند. همچنین محلول‌پاشی به‌غیر از فعالیت آنزیم کاتالاز، اثر معنی‌داری بر فعالیت سایر آنزیم‌های اندازه‌گیری شده داشت. اثر متقابل تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی بر میزان فعالیت کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بودند (جدول ۲). تنش خشکی شدید منجر به افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شد. بیش‌ترین فعالیت کاتالاز مربوط به کاربرد ۲/۵ در هزار به‌همراه استفاده از کیتوزان و ترکیب ۵۰ درصد کیتوزان و فولویک‌اسید تحت تنش شدید خشکی (به ترتیب ۴/۷ و ۴/۶ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) بود. همچنین کاربرد ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه فولویک‌اسید تحت تنش شدید خشکی نیز دارای بالاترین فعالیت این آنزیم بود. این تیمارها به ترتیب منجر به افزایش ۸۹/۳، ۸۹/۱ و ۸۹/۷ درصدی فعالیت کاتالاز در مقایسه با تیمار شاهد شدند. کم‌ترین فعالیت کاتالاز در تیمار شاهد (عدم کاربرد نانوکود پتاسیم و عدم محلول‌پاشی به‌همراه آبیاری نرمال) با میانگین ۰/۵ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه مشاهده شد (جدول ۳). کاربرد ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی فولویک‌اسید تحت شرایط تنش شدید منجر به ایجاد بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز (۲۰ و ۱۸/۵ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) گردید که در مقایسه با شاهد، افزایش ۸۳ و ۸۱/۶ درصدی داشتند. کم‌ترین فعالیت این آنزیم مربوط به کاربرد کیتوزان به‌تنهایی یا در ترکیب با فولویک‌اسید به‌همراه عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت شرایط بدون تنش بود (جدول ۳).

عدم استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشدی (نانوکود پتاسیم، کیتوزان و فولویک‌اسید) تحت شرایط تنش شدید خشکی باعث افزایش ۸۹/۲ درصدی فعالیت آسکوربات پراکسیداز در مقایسه با تیمار شاهد شد. کاربرد تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید به همراه عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت شرایط بدون تنش نیز کم‌ترین فعالیت آسکوربات پراکسیداز (۱/۲) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) را داشت (جدول ۳). در تنش شدید خشکی، کاربرد تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید به همراه ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم در مقایسه با تیمار شاهد در همین سطح از تنش خشکی و نانوکود پتاسیم، منجر به کاهش ۳۴/۷ درصدی فعالیت سوپراکسیو دیسموتاز شد. بیش‌ترین فعالیت این آنزیم، مربوط به تیمار عدم محلول‌پاشی به همراه کاربرد ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت تنش شدید خشکی (۹/۵) واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین) بود. کم‌ترین فعالیت سوپراکسید دیسموتاز نیز در کاربرد کیتوزان و فولویک‌اسید به همراه عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت تنش متوسط (هر دو با میانگین ۴/۱ واحد آنزیم بر میلی‌گرم پروتئین) مشاهده شد (جدول ۳).

۲.۳. صفات رشدی و عملکردی

اثر تنش خشکی و نانوکود پتاسیم بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شدید خشکی منجر به کاهش معنی‌دار (۱۱/۹ درصد) ارتفاع بوته شد. همچنین تفاوت معنی‌داری مابین سطوح بدون تنش و تنش متوسط از نظر ارتفاع بوته مشاهده نشد (جدول ۴). کاهش ارتفاع بوته نتیجه کاهش محتوای کلروفیل و سطح فتوسنتزکننده (سطح برگ)، افزایش انرژی مصرفی گیاه برای جذب آب، افزایش تراکم پروتوپلاسم، تغییر در مسیرهای تنفس، فعال‌شدن مسیر پنتوز فسفات و/یا کاهش حجم ریشه و غیره است (Moaveni et al., 2010; Fracasso et al., 2020). در این راستا نتایج مشابهی در مورد گیاه کتجد (Mahdavi Khorami et al., 2020) و کلزا (Hemmati et al., 2019) گزارش شده است. کاربرد نانوکود پتاسیم منجر به افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته شد. به همین ترتیب، مؤثرترین غلظت نانوکود پتاسیم برای افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، ۱/۵ در هزار بود که در مقایسه با تیمار بدون کاربرد کود افزایش ۱۴/۵ درصدی نشان داد (جدول ۴). Saedi et al. (2020) گزارش کردند که کاربرد پتاسیم منجر به افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به سمت برگ‌ها می‌شود و گیاهانی که کمبود پتاسیم دارند اغلب دارای نیتروژن زیاد و کمبود هیدرات‌های کربن هستند که این وضعیت تولید ریشه‌ها را کاهش داده و منجر به افت پارامترهای رشدی از جمله ارتفاع بوته و عملکرد می‌شود.

تنش خشکی شدید منجر به کاهش تعداد شاخه جانبی، اما کاربرد تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید باعث افزایش میانگین این صفت شد. خشکی با کاهش مقدار آب و افت تورژسانس سلول، کاهش پتانسیل کل آب، پژمردگی، بسته‌شدن روزنه‌های و کاهش اندازه سلول و در نهایت افت پارامترهای رشدی و مورفولوژیکی می‌شود. هر چقدر شدت تنش کم‌آبی، بیش‌تر باشد، رشد اندام هوایی به همان نسبت افت خواهد داشت که افزایش آسبیزیک‌اسید در اندام هوایی یکی از دلایل این کاهش می‌تواند باشد (Bahrampoor et al., 2019). در شرایط یکسان محیطی، کاربرد کودهای مختلف به منظور تأمین عناصر غذایی برای گیاه منجر به افزایش پارامترهای رشدی گیاه هم‌چون ارتفاع بوته و تعداد شاخه جانبی می‌شود (Mahdavi et al., 2018). در مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه (جدول ۳)، تیمار کاربرد تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید به همراه ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت شرایط آبیاری نرمال دارای بیش‌ترین تعداد شاخه جانبی بود که افزایش ۳۵/۳ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد داشت. تحت شرایط تنش شدید خشکی، کاربرد تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید به همراه ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم منجر به افزایش ۱۲/۵ درصدی تعداد شاخه جانبی در مقایسه با تیمار شاهد در همین سطح تنش شد (جدول ۳). فولویک‌اسید فعال‌ترین ترکیب هیومیک بوده و منجر به افزایش حلالیت و جذب عناصر غذایی از طریق کمپلکس می‌شود. در این راستا، پژوهش‌گران بیان داشتند که

فولویک‌اسید بر تعداد شاخه جانبی، عملکرد دانه، محتوای روغن و پروتئین دانه اثر معنی‌دار و افزایش‌دهنده تحت شرایط تنش خشکی داشت (Ayoubizadeh *et al.*, 2019)

در مقایسه میانگین تنش خشکی و نانوکود پتاسیم، بیش‌ترین شاخص سطح برگ مربوط به استفاده از ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت تیمار بدون تنش بود. در سطح تنش خشکی شدید، استفاده از ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم، افزایش ۱۹/۶ درصدی شاخص سطح برگ را در مقایسه با تیمار بدون کاربرد نانوکود پتاسیم نشان داد. کم‌ترین شاخص سطح برگ (۳/۵۲) نیز مربوط به عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت تنش شدید بود (شکل ۱-C). Li *et al.* (2020) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش تعداد و سطح برگ به‌علت پیری و ریزش می‌شود. کاربرد هم‌زمان ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه ۵۰ درصد کیتوزان و فولویک‌اسید با میانگین ۴/۸۶، بالاترین شاخص سطح برگ را داشت که منجر به افزایش ۲۳/۸ درصدی میانگین این صفت در مقایسه با شاهد شد. یکی از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش تورژسانس سلول و کاهش سطح تعرق‌کنندگی گیاه می‌باشد. در این شرایط جذب مواد غذایی کند شده و رشد و توسعه سلول‌ها در اندام هوایی برگ و ساقه اُفت خواهد داشت و در نتیجه سطح برگ و سایر پارامترهای رشدی کاهش نشان می‌دهد. از طرف دیگر، استفاده از نانوکود پتاسیم با توجه به کاهش پتانسیل اسمزی سلول و افزایش جذب عناصر از خاک، افزایش پارامترهای رشدی را در پی دارد. از این‌رو، کاربرد این کود تحت شرایط کمبود آب، افزایش سطح برگ، ارتفاع گیاه، تعداد برگ و سایر موارد رشدی و عملکردی شد (Bahrampoor *et al.*, 2019). مصرف کیتوزان منجر به افزایش سطح برگ شد. از دلایل این امر می‌توان به اثرات مثبت کیتوزان روی ژن‌های مسئول سازنده کلروفیل اشاره کرد که تولید کلروفیل و در نتیجه سطح برگ را افزایش می‌دهد (Malekpoor *et al.*, 2016). علاوه بر این، افزایش جذب نیتروژن توسط کیتوزان، افزایش میزان اسیدهای نوکلئیک و آمینواسیدها و در نتیجه افزایش تکثیر سلولی را نیز می‌توان از دلایل افزایش سطح برگ برشمرد (Heng *et al.*, 2012).

تعداد کپسول در بوته از اجزای اصلی عملکرد دانه در گیاه کنگد می‌باشد که تحت تأثیر تنش خشکی، نانوکود پتاسیم، محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید و هم‌چنین اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود پتاسیم، تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۲). کاربرد ۲/۵ و ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت تنش متوسط، بیش‌ترین تعداد کپسول در بوته را نشان دادند که افزایش ۳۴/۸ و ۲۰/۷ درصدی در مقایسه با شاهد داشتند. عدم استفاده از نانوکود پتاسیم تحت تنش متوسط و شدید، کم‌ترین میانگین این صفت (۱۹/۷ و ۱۶/۷ عدد) را نشان دادند (شکل ۱-D). استفاده از کود پتاسیم با کاهش پتانسیل اسمزی منجر به بهبود رطوبت برگ و روابط آبی گیاه می‌شود. این امر، پایداری میزان فتوسنتز خالص، تعرق و هدایت روزنه‌ای را تحت تنش کمبود آب را پی خواهد داشت و در نتیجه افزایش پارامترهای رشدی و عملکردی حاصل می‌شود (Saedi *et al.*, 2020). هم‌چنین، کاربرد کیتوزان منجر به بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق و در نتیجه کاهش مصرف آب را در گیاه فلفل باعث شد. عملکرد ضد تعرق کیتوزان مربوط به دخالت این ترکیب در مسیرهای تولید ABA می‌باشد (Malekpoor *et al.*, 2016). تنش خشکی با کاهش تعداد، اندازه و سطح برگ در نتیجه افت پتانسیل آب خاک، منجر به افت میزان فتوسنتز و تولید اسمیلات شده و در نتیجه کاهش پارامترهای عملکردی را به‌دنبال خواهد داشت (Bahrampoor *et al.*, 2019). کاهش تعداد کپسول در بوته در گیاه کنگد در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است (Mahdavi Khorami *et al.*, 2020; Zarei *et al.*, 2020). استفاده از نانوکود پتاسیم، کیتوزان و فولویک‌اسید، افزایش تعداد کپسول را در پی داشت. در این راستا، Mahdavi *et al.* (2018) بیان داشتند که نانوکود پتاسیم منجر به افزایش تعداد کپسول در بوته کنگد شد.

اثر متقابل سه‌گانه بر تعداد دانه در کپسول معنی‌دار بود (جدول ۲). استفاده هم‌زمان از ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم و

فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با ۵۰ درصد کیتوزان تحت شرایط بدون تنش به‌ترتیب با میانگین ۵۵/۷ و ۵۲/۶ دانه، بیش‌ترین میانگین این صفت را داشتند که در مقایسه با شاهد افزایش ۶۱/۹ و ۵۹/۶ درصدی نشان دادند. عدم کاربرد نانوکود پتاسیم و عدم محلول‌پاشی و کاربرد ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه عدم محلول‌پاشی تحت تنش شدید به‌ترتیب با میانگین ۱۳/۱ و ۱۴/۱ دانه در کپسول، کم‌ترین میانگین این صفت را داشتند (جدول ۳). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جریان آب در برگ بستگی به وجود شیب‌های بالقوه آب بین آوند چوبی و برگ دارد، بنابراین کاهش پتانسیل آب آوند چوبی باعث کاهش شیب پتانسیل آب بین آوند چوبی و برگ می‌شود. بنابراین، تعداد دانه تحت تنش خشکی کاهش می‌یابد (Hemmati et al., 2019; Carrière et al., 2020). از طرف دیگر، پژوهش‌گران بیان داشتند که فولویک‌اسید با دارا بودن مواد آلی بیش‌تر، افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه و تخصیص مواد فتوسنتزی بالاتر به قسمت‌های زایشی منجر به افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاه می‌شود (Ayoubizadeh et al., 2019).

وزن هزاردانه بیش‌تر تحت تأثیر ژنتیک گیاه است اما عواملی زراعی و محیطی نیز می‌تواند منجر به تغییر آن شود (Mahdavi et al., 2018). اثر تنش خشکی، نانوکود پتاسیم، محلول‌پاشی و اثرات متقابل تنش خشکی و نانوکود پتاسیم، تنش خشکی و محلول‌پاشی و همچنین نانوکود پتاسیم در محلول‌پاشی بر وزن هزاردانه معنی‌دار بودند (جدول ۲). نتایج نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار شده اما کاربرد نانوکود پتاسیم و همچنین محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید منجر به افزایش معنی‌دار وزن هزاردانه شد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهش‌گران در مورد گیاه کتجد گزارش شده است (Mahdavi et al., 2018; Zarei et al., 2020). استفاده از ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم در هر سه سطح از تنش خشکی دارای بیش‌ترین وزن هزاردانه بود. به‌بیان دیگر، استفاده از این سطح از نانوکود پتاسیم تحت تنش شدید خشکی بیش‌ترین وزن هزاردانه (۳/۳۷ گرم) را داشت که در مقایسه عدم کاربرد نانوکود پتاسیم در این سطح از تنش، افزایش ۴۹/۲ درصدی نشان داد. کم‌ترین وزن هزاردانه مربوط به عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت تنش شدید خشکی (۱/۷۱ گرم) بود (شکل ۱-E). کاربرد هم‌زمان ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با ۵۰ درصد کیتوزان، تیمار برتر از نظر وزن هزاردانه بودند که افزایش ۴۹/۷ و ۴۶/۹ درصدی در مقایسه با شاهد داشتند. روند تولید و توزیع مواد فتوسنتزی بعد از گرده‌افشانی (شامل فتوسنتز جاری و یا انتقال مجدد ذخیره‌شده در ساقه، برگ و یا کپسول) به‌طور مستقیم بر وزن هزاردانه تأثیرگذار است.

اثر تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی و همچنین اثر متقابل نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی بر عملکرد دانه معنی‌دار بودند (جدول ۲). در مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی، بیش‌ترین عملکرد دانه مربوط به کاربرد ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه استفاده از فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با ۵۰ درصد کیتوزان (به‌ترتیب ۲۵۱۶، ۲۲۷۷/۵، ۲۵۰۶/۶ و ۲۳۱۳/۲ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد. کم‌ترین عملکرد دانه مربوط به عدم کاربرد نانوکود پتاسیم و عدم محلول‌پاشی بود. Pourghasemian et al. (2020) بیان داشتند که قطع آبیاری در مراحل مختلف رشدی (به‌ویژه بعد از گلدهی)، باعث کاهش انتقال مواد غذایی از ریشه، برگ و سایر قسمت‌های گیاه به دانه و همچنین میزان فتوسنتز می‌شود که در نهایت طول دوره پرشدن دانه و رسیدگی کاهش یافته و نقصان عملکرد دانه اتفاق می‌افتد. همچنین سایر پژوهش‌گران نتیجه‌گیری کردند که کاهش عملکرد دانه در نتیجه افت میزان جذب مواد غذایی، می‌تواند به‌دلیل کاهش پارامترهای رشدی از جمله ارتفاع گیاه، تعداد برگ، شاخص سطح برگ و غیره باشد که در نهایت افت فتوسنتز و کم‌شدن سهم دانه در دریافت کربوهیدرات‌ها را در پی خواهد داشت (Mahdavi et al., 2018). Saedi et al. (2020) بیان داشتند که کودهای نانو به‌دلیل ساختار خود و رهاسازی آرام عناصر، تأثیر بسیاری در جذب عناصر توسط گیاهان دارند که سبب افزایش جذب، فتوسنتز بیش‌تر و در نهایت افزایش شاخص‌های رشدی و عملکردی

می‌شوند. در پژوهش‌های مختلفی اثر افزایش نانوکود پتاسیم بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان کنگد (Mahdavi et al., 2018) و نناع فلفلی (Saedi et al., 2020) تحت شرایط نرمال و تنش به اثبات رسیده است. فولویک‌اسید به‌عنوان مواد هوموسی نفوذپذیری غشای سلولی را افزایش داده و ورود یون پتاسیم را نیز به داخل سلول تسهیل می‌نماید و از این طریق فشار سلولی و تقسیم سلولی بالاتر خواهد رفت. از طرف دیگر، افزایش انرژی داخل سلولی، منجر به تولید کلروفیل و افزایش میزان فتوسنتز در گیاه خواهد شد (Ayoubizadeh et al., 2019).

۳.۳. صفات کیفی دانه

نتایج نشان اثر معنی‌دار تنش خشکی، نانوکود پتاسیم، محلول‌پاشی و اثر متقابل تنش خشکی در نانوکود پتاسیم بر محتوای روغن دانه بود (جدول ۲). بالاترین محتوای روغن دانه مربوط به کاربرد ۱/۵ و ۲/۵ در هزار نانوکود پتاسیم تحت شرایط آبیاری نرمال بود که افزایش ۱۳/۲ و ۱۵/۴ درصدی در مقایسه با تیمار شاهد داشتند. کم‌ترین روغن دانه نیز در عدم کاربرد نانوکود پتاسیم تحت شرایط تنش شدید خشکی با میانگین ۳۳/۲ درصد مشاهده شد (شکل ۱-F). درصد روغن دانه بیش‌تر تحت تأثیر ژنتیک گیاه بوده اما سیستم‌های به‌زراعی و کوددهی در زمان مناسب، می‌تواند منجر به افزایش درصد روغن شود (Mahdavi Khorami et al., 2020). استفاده از هر دو غلظت نانوکود پتاسیم در مقایسه با عدم کاربرد آن، افزایش محتوای روغن دانه را در پی داشت. به‌همین ترتیب، محلول‌پاشی فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با کیتوزان باعث ایجاد بالاترین محتوای روغن دانه شد. Zarei et al. (2020) نتیجه‌گیری کردند که تغذیه مناسب‌تر با عناصر باعث ایجاد فتوسنتز مطلوب‌تر و رشد بهتر کنگد شده و از این طریق درصد و عملکرد روغن دانه افزایش نشان خواهد داد. Zarei et al. (2020) و Alaviasl et al. (2016) گزارش کردند که تحت تنش خشکی، کاربرد کیتوزان منجر به افزایش عملکرد دانه و محتوای روغن دانه کنگد شد. کاهش درصد روغن در اثر تنش خشکی می‌تواند به‌علت اختلال در فرایندهای متابولیکی بذر و آسیب به انتقال آسیمیلات‌ها به دانه باشد. Bellaloui et al. (2011) دلیل کاهش درصد روغن دانه در اثر تنش خشکی را کاهش فتوسنتز جاری و طول دوره پرشدن دانه ذکر نمودند. به‌نظر می‌رسد کاربرد کود با افزایش میزان عناصر مورد نیاز گیاه تحت شرایط تنش، منجر به بهبود رشد و افزایش سنتز میزان روغن و عملکرد آن می‌شود (Mahdavi Khorami et al., 2020).

محتوای پروتئین دانه تحت تأثیر تنش خشکی، نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی و اثر متقابل این سه عامل، تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۲). بیش‌ترین محتوای پروتئین دانه (۲۸/۴ درصد) در کاربرد ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم به‌همراه محلول‌پاشی کیتوزان تحت تنش متوسط به‌دست آمد که با تیمارهای محلول‌پاشی فولویک‌اسید به‌تنهایی یا در ترکیب با کیتوزان در همین سطح تنش یا شرایط بدون تنش در گروه مشترک آماری قرار داشتند. کم‌ترین پروتئین دانه در کاربرد ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم و تیمار بدون محلول‌پاشی تحت تنش شدید خشکی با میانگین ۱۲/۳ درصد به‌دست آمد (جدول ۳). در این راستا، Mahdavi et al. (2018) نتایج مشابهی مبنی بر اثر افزایش پروتئین دانه با کاربرد نانوکود پتاسیم تحت شرایط تنش خشکی را گزارش کردند. هم‌چنین، اسیدهای آلی هم‌چون فولویک‌اسید، با بهبود جذب و سهولت جذب عناصر میکرو و ماکرو باعث افزایش محتوای پروتئین دانه کنگد شد (Ayoubizadeh et al., 2019).

۴. نتیجه‌گیری

کاربرد نانوکود پتاسیم و محلول‌پاشی کیتوزان و فولویک‌اسید با تعدیل میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، سوپراکسیددیسموتاز، پراکسیداز و آسکورات پراکسیداز و هم‌چنین محتوای پرولین و افزایش بیش از ۱۰ درصدی

محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، منجر به تعدیل اثرات منفی ناشی از تنش خشکی شد. در همین راستا، افت پارامترهای رشدی و عملکردی و همچنین کیفی دانه، تحت شرایط تنش خشکی شدید در تیمارهای محلول‌پاشی و نانوکود پتاسیم در مقایسه با تیمار عدم کاربرد کود، بسیار کمتر بود. استفاده از غلظت ۱/۵ در هزار نانوکود پتاسیم با توجه به اهمیت عملکرد دانه و روغن از برتری معنی‌دار در مقایسه با سایر سطوح برخوردار بود. در مجموع، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از نانوکود پتاسیم در غلظت ۱/۵ در هزار و همچنین محلول‌پاشی تلفیقی کیتوزان و فولویک‌اسید (۵۰ درصد) تحت شرایط تنش خشکی شدید، منجر به افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه کنگد شد.

۵. تشکر و قدردانی

از مدیر گروه کشاورزی و مدیریت دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان و همچنین مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) به‌خاطر مساعدت برای اجرای این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورداستفاده

- Alaviasl, S. A., Mansourifar, S., Modarres Sanavy, S. A. M., Sadatasilan, K., Tabatabaei, S. A., & Moradi Ghahderijani, M. (2016). Effect of chitosan and zeolite on growth and yield of sesame (*Sesamum indicum* L.) under different irrigation conditions in Yazd. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9, 163-172. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2016.362>
- Ali, E., El-Shehawi, A., Ibrahim, O., Abdul-Hafeez, E., Moussa, M., & Hassan, F. (2021). A vital role of chitosan nanoparticles in improvisation the drought stress tolerance in *Catharanthus roseus* (L.) through biochemical and gene expression modulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 161, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.008>
- Aqaei, P., Weisany, W., Diyanat, M., Razmi, J., & Struik, P. C. (2020). Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 1205-1216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>
- Aron, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Arslan, H., Ekin, Z., & Hatipoglu, H. (2018). Performances of sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) with different seed shell colors in semi-arid climate conditions. *Fresenius Environmental Bulletin*, 27, 8139-8146.
- Asadi, H., Baradaran, R., Seghatoleslami, M., & Mousavi, S. (2020). Evaluation of drought tolerance in some sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes based on stress tolerance indices. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18, 413-433. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jcsc.2020.88165>
- Ayoubizadeh, N., Laei, G., Amini dehaghi, M., Masoud Sinaki, J., & Rezvan Bidokhti, S. (2020). 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. *Journal of Crops Improvement*, 22, 231-243. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.281730.2220>
- Ayoubizadeh, N., Laei, G., Amini, D. M., Masood, S. J., & Rezvan, S. (2019). Effect of foliar application of iron nano-chelate and folic acid on seed yield and some physiological traits of sesame cultivars under drought tension conditions. *Crop Physiology Journal*, 40, 55-74. (in Persian)

- Bahrampoor, M., Dehestani-Ardakani, M., Shirmardi, M., & Gholamnezhad, J. (2019). Effect of different substrates and nano potassium fertilizer on morpho-physiological characteristics of pot Marigold (*Calendula officinalis* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 20, 65-78. (in Persian)
- Barat Zadeh, S., & Babaei Nejad, T. (2019). Effect of potassium nano-chelate and ascorbic acid on grain yield and some qualitative characteristics of cowpea (*Vigna unguiculata* L., Kamran cultivar). *Journal of Plant Production Sciences*, 9, 149-160. (in Persian)
- Bates, L. S., Waldern, R. P., & Teave, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide Dismutase. Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44, 276-287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Bellaloui, N., Ebelhar, M. W., Gillen, A. M., Fisher, D. K., Abbas, H. K., Mengistu, A., Reddy, K. N., & Paris, R. L. (2011). Soybean seed Protein, and fatty acids are altered by S and S+N fertilizers under irrigated and non-irrigated environments. *Agricultural Science*, 2(4), 465-476. <https://doi.org/10.4236/as.2011.24060>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Carrière, S. D., Martin-StPaul, N. K., Cakpo, C. B., Patris, N., Gillon, M., Chalikakis, K., Doussan, C., Oliosio, A., Babic, M., & Jouineau, A. (2020). The role of deep vadose zone water in tree transpiration during drought periods in karst settings—Insights from isotopic tracing and leaf water potential. *Science of The Total Environment*, 699, 134332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134332>
- Chance, B., & Maehly, A. C. (1955). Assay of catalase and peroxidase. *Methods in Enzymology* 2, 764-775. <https://doi.org/10.1002/9780470110171.ch14>
- Fracasso, A., Telò, L., Lanfranco, L., Bonfante, P., & Amaducci, S. (2020). Physiological beneficial effect of *Rhizophagus intraradices* inoculation on tomato plant yield under water deficit conditions. *Agronomy*, 10, 71. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010071>
- Gonzalez, E. M., De Ancos, B., & Cano, M. P. (1999). Partial characterization of polyphenol oxidase activity in raspberry fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 4068-4072. <https://doi.org/10.1021/jf981325q>
- Heng, Y., Xavier, C. F., Lars, P.C., & Kai, G. (2012). Chitosan oligosaccharides promote the content of polyphenols in Greek Oregano (*Origanum vulgare* ssp. *hirtum*). *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 60, 136-143. <https://doi.org/10.1021/jf204376j>
- Kazemi, E., Ganjali, H. R., Mehraban, A., & Ghasemi, A. (2021). Yield and biochemical properties of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) affected by nano-fertilizer under field drought stress. *Cereal Research Communications*, 31, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s42976-021-00198-2>
- Kermani, S. G., Saeidi, G., Sabzalian, M. R., & Gianinetti, A. (2019). Drought stress influenced sesamin and sesamol content and polyphenolic components in sesame (*Sesamum indicum* L.) populations with contrasting seed coat colors. *Food Chemistry*, 289, 360-368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.004>
- Khordadi-Varamin, J., Fanoodi, F., Sinaki, J. M., Rezvan, S., & Damavandi, A. (2020). Foliar application of chitosan and nano-magnesium fertilizers influence on seed yield, oil content, photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activities of sesame (*Sesamum indicum* L.) under water-limited conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48, 2228-2243. <https://doi.org/10.15835/nbha48411852>

- Kouighat, M., Hanine, H., El Fechtali, M., & Nabloussi, A. (2021). First report of sesame mutants tolerant to severe drought stress during germination and early seedling growth stages. *Plants*, *10*, 1166. <https://doi.org/10.3390/plants10061166>
- Li, H., Guo, Q., Jing, Y., Liu, Z., Zheng, Z., Sun, Y., Xue, Q., & Lai, H. (2020). Application of *Streptomyces pactum* Act12 enhances drought resistance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*, 122-132. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09968-z>
- Mahdavi Khorami, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., Rezvan, S., & Damavandi, A. (2020). Sesame (*Sesame indicum* L.) biochemical and physiological responses as affected by applying chemical, biological, and nano-fertilizers in field water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *43*, 456-475. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1683189>
- Mahdavi, K. A., Masoud, S. J., Amini, D. 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. *Journal of Crops Improvement*, *20*(1), 263-284. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2018.231648.1718>
- Mahsavi Khorami, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., Rezvan, S., & Damavandi, A. (2019). The Effect of Using Nitrogen and Potassium Fertilizers and Irrigation Regimes on Grain Yield Related traits of Sesame (*Sesamum indicum* L.). *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing*, *9*(1), 173-188. (in Persian). <https://doi.org/10.29252/jcpp.9.1.173>
- Malekpoor, F., Salimi, A., & Ghasemi Pirbalouti, A. (2016). Effect of bioelicitor of chitosan on physiological and morphological properties in purple basil (*Ocimum basilicum* L.) under water deficit. *Journal of Plant Ecophysiology*, *27*(8), 53-71. (in Persian)
- Mikkelsen, R. (2018). Nanofertilizer and nanotechnology: a quick look. *Better Crops with Plant Food*, *102*, 18-19. <https://doi.org/10.24047/BC102318>
- Moaveni, P., Ebrahimi, A., & Farahani, H. A. (2010). Physiological growth indices in winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars as affected by drought stress at Iran. *Journal of Cereals and Oilseeds*, *1*, 11-16. (in Persian)
- Mwenye, O. J., Van Rensburg, L., Van Biljon, A., & Van der Merwe, R. (2016). The role of proline and root traits on selection for drought-stress tolerance in soybeans: a review. *South African Journal of Plant and Soil*, *33*, 245-256. <https://doi.org/10.1080/02571862.2016.1148786>
- Poudineh, Z., Moghadam, Z. G., & Mirshekari, S. (2015). Effects of humic acid and folic acid on sunflower under drought stress. *Biological Forum, An International Journal*, *7*(1), 451-454.
- 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>
- Saedi, F., Sirousmehr, A., & Javadi, T. (2020). Effect of nano-potassium fertilizer on some morpho-physiological characters of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, *33*, 35-45. (in Persian)
- Salamati, N., & Danaie, A. (2020). Investigation of drought stress indices in sesame surface water deficit. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *51*, 949-959. (in Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.289522.668324>
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., & Khanna, K. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*, 509-531. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>
- Shehzad, M. A., Nawaz, F., Ahmad, F., Ahmad, N., & Masood, S. (2020). Protective effect of potassium and chitosan supply on growth, physiological processes and antioxidative machinery in sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *187*, 109841. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109841>

- Statistical Center of Ministry of Agriculture Jihad. (2020). *Crop statistics*. Agricultural Research, Education and Extension Organization Publisher, Iran.
- Sultana, S., Islam, M., Khatun, M., Hassain, M., & Huque, R. (2017). Effect of foliar application of oligo-chitosan on growth, yield and quality of tomato and eggplant. *Asian Journal of Agricultural Research*, 11, 36-42. <https://doi.org/10.3923/ajar.2017.36.42>
- Wendel A (1981). Glutathione peroxidase. *Methods in Enzymology*, 77, 325-333.
- Zarei, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., & Damavandi, A. (2020). Evaluation of biochemical and agronomic traits of sesame cultivars under application of phosphorus nano-chelate and chitosan fertilizers under irrigation cut-off. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14, 471-483. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2019.2036.1503>