



The Effect of Foliar Application of Paulownia Nanofertilizer on Yield and Some Physiological Traits of Soybean under Different Levels of Irrigation

Nasrin Ghamari Rahim¹ | Yousef Sohrabi²✉

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: y.sohrabi@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: April 30, 2024
Received in revised form:
October 06, 2024
Accepted: October 12, 2024
Published online: March 21,
2025

Keywords:

Chlorophyll,
nanofertilizer,
osmolyte,
relative water content of
leaves,
root growth.

ABSTRACT

To investigate the effect of foliar spraying of different concentrations of paulownia nanofertilizer on yield and some physiological traits of soybean under water deficit conditions, a pot experiment was conducted in 2018 in the greenhouse of Kurdistan University's Faculty of Agriculture. The study was conducted as a factorial experiment in a randomized complete block design with three replications. Three irrigation regimes of 100% (full irrigation), 80% (moderate stress) and 60% (severe stress) of the soil agricultural capacity as the levels of the first factor and different concentrations of foliar spraying (0, 15, 30, 60, and 120 ppm) with nanofertilizer paulownia was considered as the second factor levels. The results showed that the amounts of traits related to soybean root growth decreased significantly with the occurrence and increase of drought stress intensity. Using concentrations of 30, 60, and 120 ppm under severe drought stress conditions, increased grain yield by 41, 39, and 38.2%, respectively, compared to control. Considering the positive effects of using paulonia nanofertilizer on increasing dry weight and root volume, plant osmotic regulation, improving relative water content, and the content of photosynthetic pigments of the plant, and finally increasing soybean yield, it can be stated that the use of this nanofertilizer at concentrations of 30, 60, and 120 ppm can be useful and effective in modulating the severe drought stress impact on soybean growth and yield.

Cite this article: Ghamari Rahim, N., & Sohrabi, Y. (2025). The effect of foliar application of paulownia nanofertilizer on yield and some physiological traits of soybean under different levels of irrigation. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(1), 123-141. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.374379.655072.



© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijfcs.2024.374379.655072>



اثر محلول پاشی نانوکود کربن دار پالونیا بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک سویا تحت سطوح مختلف آبیاری

نسرين قمري رحيم^۱ | يوسف سهرابي^۲ ✉

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۲. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: y.sohrabi@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱</p>	<p>برای بررسی اثر محلول پاشی غلظت‌های مختلف نانوکود پالونیا بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیکی سویا تحت شرایط کمبود آب، آزمایشی گلدانی در سال ۱۳۹۸ در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. سه رژیم آبیاری ۱۰۰٪ (آبیاری کامل)، ۸۰٪ (تنش متوسط) و ۶۰٪ درصد (تنش شدید) ظرفیت زراعی خاک به عنوان سطوح فاکتور اول و غلظت‌های مختلف محلول پاشی (صفر، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام) با نانوکود پالونیا به عنوان سطوح فاکتور دوم در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که مقادیر صفات مرتبط با رشد ریشه سویا با بروز و افزایش شدت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کاربرد غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام در شرایط تنش خشکی شدید، عملکرد دانه را به ترتیب حدود ۴۱، ۳۹ و ۳۸/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. با توجه به اثرات مثبت استفاده از نانوکود پالونیا بر افزایش وزن خشک و حجم ریشه، تنظیم اسمزی گیاه، بهبود محتوای نسبی آب برگ، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و در نهایت، افزایش عملکرد دانه، می‌توان اظهار داشت که استفاده از این نانوکود در غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام می‌تواند در تعدیل اثرات تنش شدید خشکی بر رشد و عملکرد سویا مؤثر و مفید باشد.</p>
<p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>اسمولیت، رشد ریشه، کلروفیل، محتوای نسبی آب برگ، نانوکود.</p>	

استناد: قمري رحيم، ن. و سهرابي، ی. (۱۴۰۴). اثر محلول پاشی نانوکود کربن دار پالونیا بر عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک سویا تحت

سطوح مختلف آبیاری. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۱)، ۱۲۳-۱۴۱. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.374379.655072



۱. مقدمه

سویا، به عنوان یکی از مهم ترین حبوبات و به دلیل ترکیبات ارزشمند دانه، از محصولات غذایی است که به طور گسترده در جهان کشت می شود (Arya *et al.*, 2021). سطح زیر کشت سویا در ایران ۸۶۰۰۰ هکتار و میزان تولید آن ۲۱۰۰۰۰ تن با میانگین عملکرد ۲۴۴۲ کیلوگرم در هکتار است (Faostat, 2022). افزایش دمای جهانی، تغییر الگوی بارندگی و بروز خشکی های ممتد، تهدید قابل توجهی برای تولید گیاهان زراعی به ویژه در مناطق کم آب محسوب می گردد (Jin *et al.*, 2017; Cotrim *et al.*, 2021). تولید مطلوب سویا در بسیاری از مناطق، به وجود آب کافی وابسته است (Suriadi *et al.*, 2021; Droppers *et al.*, 2021)؛ مطالعات نشان داده است وقوع تنش خشکی، عملکرد دانه سویا را شدیداً تحت تأثیر قرار می دهد و حتی می تواند عملکرد این گیاه را بیش از ۵۰٪ کاهش دهد و باعث زیان های مالی قابل توجهی برای کشاورزان شود (Wei *et al.*, 2018).

گیاهان برای مقابله با تنش خشکی مکانیسم های مختلفی را به کار می گیرند. یکی از راه های مقابله گیاهان با تنش خشکی افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان می باشد. سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD)، و آسکوربات پراکسیداز (APX) آنزیم های مهمی برای حفاظت از گیاه و کاهش آسیب اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی هستند (Gill & Tuteja, 2010). همچنین محتوای پرولین آزاد، قندها و پروتئین های محلول ارتباط نزدیکی با مقاومت به تنش در گیاهان دارد. به طور کلی، این مواد در تنظیم اسمزی و پیشگیری از وقوع کم آبی در گیاه تحت شرایط تنش خشکی نقش دارند. از طریق تنظیم محتویات این ترکیبات، مقدار پتانسیل آب در سلول ها برای حفظ فشار تورگر کاهش می یابد و بنابراین فعالیت های متابولیکی به صورت طبیعی انجام خواهد شد (Dong *et al.*, 2019). کمبود مواد مغذی معدنی در محصولات کشاورزی به ویژه در شرایط نامساعد خاکی و اقلیمی، رایج است (Ahmadi & Souri, 2019; Souri & Bakhtiarizade, 2019). وقوع تنش هایی مانند تنش خشکی به ویژه در مرحله رشد زایشی گیاه به کمبود جذب و انتقال مواد معدنی به گیاه منجر می شود (Di Sia, 2017). از این رو، کمیت و کیفیت دانه تولید شده در چنین شرایطی به طور جدی به چالش کشیده می شود (Basal *et al.*, 2020) و نیازمند تعیین و به کارگیری استراتژی هایی برای کاهش اثرات تنش خشکی بر تولید این گیاه در راستای تأمین نیاز جهانی آن است.

کارایی استفاده از مواد شیمیایی در کشاورزی زیر ۳۰ درصد می باشد (Albanese *et al.*, 2012). این در حالی است که مقدار مصرف یک نانوکود در مقایسه با کودهای رایج، بسیار پایین و کارایی آن بسیار بالا می باشد و استفاده از این کودها می تواند آلودگی آب های زیرزمینی و آلودگی های زیست محیطی را تا حد زیادی کاهش دهد (Morales-Díaz *et al.*, 2017). امروزه استفاده از نانوکودها رو به افزایش است. سنتز سبز نانوذرات، ارزان و سازگار با محیط زیست است، به آسانی برای سنتز در مقیاس بزرگ قابل انجام است و نیازی به استفاده از فشار، انرژی، دما و مواد شیمیایی سمی ندارد و بنابراین استفاده از روش های فیزیکی و شیمیایی برای سنتز کاهش می یابد (Bisht *et al.*, 2022). نانوکودهای برگی برای استفاده در مزرعه مناسب هستند، زیرا می توان آنها را به تدریج و کاملاً کنترل شده روی گیاهان اعمال کرد که در نهایت، باعث کاهش علائم سمیتی می شود که ممکن است به دنبال کاربرد خاکی آن ایجاد گردد (Kah *et al.*, 2019). علاوه بر این، کوددهی به روش محلول پاشی ضمن مصرف کمتر کود، ساده تر و ارزانه تر از مصرف خاکی نانوکودها است و گیاهان واکنش بهتری به کوددهی برگی نسبت به کوددهی خاکی نشان می دهند (Gutiérrez-Ruelas *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2019). کاربرد کود به صورت محلول پاشی، مواد مغذی را مستقیماً به اندام هدف می رساند و به کاهش اثرات منفی تنش کمک می کند (Morales-Díaz *et al.*, 2017). نانوکودها می توانند دسترسی سریع به مواد مغذی در مکان های رشد گیاه را افزایش دهند و در نتیجه، موجب افزایش تولید کلروفیل، بهبود سرعت فتوسنتز و در نهایت، افزایش رشد و نمو گیاهان شوند (Babu *et al.*, 2022). در مطالعه ای، کاربرد نانوکودهای کربن دار به واسطه تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه باعث افزایش سنتز پروتئین های محلول و افزایش محتوای رنگیزه های

کلروفیل و کاروتنوئید گردید. افزایش سنتز پروتئین‌های محلول که به عنوان تنظیم‌کننده و محافظت‌کننده اسمزی عمل می‌کنند، وضعیت تنش گیاه را در شرایط تنش بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، افزایش سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی و جلوگیری از تخریب آنها باعث بهبود فتوسنتز در گیاه می‌شود که در نهایت، به افزایش رشد و عملکرد گیاه منجر می‌گردد. لذا، محلول-پاشی گیاه توسط این نانوکودهای کربن‌دار می‌تواند برخی از اثرات تنش خشکی را تعدیل نماید (Sohrabi et al., 2022).

افزایش عملکرد گیاهان استراتژیکی مانند سویا در راستای تأمین خوراک دام و طیور و همچنین روغن مورد نیاز جمعیت رو به رشد دنیا خصوصاً در مناطقی که با تنش‌های جدی مواجه هستند از اهمیت بالایی برخوردار است. تنش کمبود آب در اکثر مناطق ایران وجود دارد و به دلیل تغییرات اقلیمی ایجاد شده، وقوع آن شدت بیشتری گرفته است. این مطالعه با هدف بررسی اثرات احتمالی محلول‌پاشی نانوکود بیوسنتز شده از برگ‌های درخت پالونیا روی رشد، عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه سویا تحت سطوح مختلف آبیاری طراحی شد. تحقیق حاضر، به دنبال پاسخ به این سوال است که آیا می‌توان اثرات نامطلوب تنش خشکی بر رشد و عملکرد سویا را با استفاده از غلظت‌های مختلف نانوکود پالونیا تعدیل کرد؟

۲. روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر به صورت گلدانی در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان با حداقل و حداکثر دمای ۱۸ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۲ درصد در سال ۱۳۹۸ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با دو فاکتور در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. آبیاری در سه سطح شامل آبیاری به میزان ۱۰۰٪ (آبیاری کامل یا شاهد)، ۸۰٪ (تنش متوسط) و ۶۰٪ ظرفیت زراعی خاک (تنش شدید) به عنوان فاکتور اول در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی نانوکود در پنج سطح شامل صفر (محلول‌پاشی با آب مقطر)، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام به عنوان فاکتور دوم مد نظر قرار گرفت. محلول‌پاشی طی فصل رشد گیاه دو بار و با فاصله ۱۴ روز همزمان با اعمال تیمارهای آبیاری روی گیاهان انجام شد (Sohrabi et al., 2022). نانوکود پالونیا از نانوکودهای کربن‌دار می‌باشد که از پودر برگ درخت پالونیا به روش هیدروترمال سبز تهیه می‌شود. روش تهیه کود به این صورت بود که ۱/۰ گرم پودر برگ درخت پالونیا با ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲/۰ میلی‌لیتر هیدروکلرید حل و داخل اتوکلاو با دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت قرار داده شد. سپس محلول در دمای اتاق، سرد شده و به دنبال آن فیلتراسیون و سانتریفیوژ با ۱۲۰۰۰ دور به مدت ۳۰ دقیقه صورت گرفت. سپس به محلول حاصله کلروفورم اضافه شد تا نمک‌ها و یون‌ها در یک فاز آبی باقی بمانند. سپس نانوکود موجود در محلول کلروفورم به آرامی روی بخار حرارت داده شد تا کلروفورم حذف گردد. در ادامه، نقاط کربن جامد برای تشکیل نقاط کربن پراکنده در محلول آب با آب مخلوط شدند. نانو کود کربن‌دار پالونیا مورد استفاده در این آزمایش ساختار کروی داشت و ترکیب شیمیایی آن دارای کربن، نیتروژن و اکسیژن بوده و از لحاظ اندازه دارای قطری بین پنج تا هشت نانومتر بود (Sohrabi et al., 2022).

آبیاری گیاهان تا مرحله غلاف‌بندی برای همه گیاهان به‌طور یکسان انجام شد. اعمال تیمارهای آبیاری در مرحله شروع غلاف‌بندی آغاز شده و تا مرحله رسیدگی ادامه پیدا کرد. اعمال تیمارهای آبیاری در گلدان‌ها به روش وزنی انجام شد. به این ترتیب که ابتدا ظرفیت زراعی خاک گلدان تعیین و گلدان در این سطح رطوبتی توزین شد. فواصل آبیاری هر پنج روز یکبار بود و در هر آبیاری، وزن گلدان تحت آبیاری کامل ملاک عمل قرار گرفت، یعنی بعد از پنج روز میزان آبی که نیاز بود تا وزن گلدان‌ها به حد ظرفیت زراعی برسد، تعیین و مصرف شد. برای تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، به میزان ۶۰ و ۸۰ درصد آب مورد نیاز تیمار آبیاری کامل، آب مصرف شد (Kiani & Sohrabi, 2022). به منظور جلوگیری از بروز خطای ناشی از اضافه‌شدن وزن بوته‌ها به وزن گلدان‌های مورد بررسی، برای هر تیمار آبیاری چند گلدان اضافی کاشته شد تا با استفاده از بوته‌های مشابه در گلدان‌های مذکور وزن بوته‌ها از وزن گلدان کسر گردد. رقم سویای

مورد استفاده L9 بود. بذور سویا به تعداد شش عدد در هر گلدان (۱۳۵ گلدان) با ابعاد ۲۵×۳۰×۲۵ سانتی متر حاوی دو کیلوگرم خاک (مخلوطی از دو قسمت خاک زراعی، یک قسمت ماسه و یک قسمت کود دامی پوسیده) کاشته شدند. در هر گلدان بعد از تنک کردن، دو بوته نگه داشته شد. برخی از اطلاعات مربوط به خاک مورد استفاده، در جدول (۱) نشان داده شده است.

۲-۱. اندازه گیری صفات

به منظور بررسی صفات فیزیولوژیک، ده روز پس از اعمال مرحله دوم محلول پاشی و تیمارهای تنش، از برگ های توسعه یافته و بالغ بالای (دوم و سوم) از دو بوته نمونه برداری انجام گرفت. نمونه های برگ با فاصله در ازت مایع قرار گرفته و تا زمان اندازه گیری صفات به آزمایشگاه منتقل و در فریزر ۴۰- درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

۲-۲. اندازه گیری حجم و وزن خشک ریشه

برای اندازه گیری حجم ریشه گیاه، در مرحله رسیدگی ریشه های هر گلدان از هر تیمار از طریق شستشوی کامل و به آرامی از خاک گلدان جدا شد. سپس از طریق قراردادن ریشه ها در استوانه های مدرج حاوی آب و تعیین میزان تغییر سطح آب، حجم ریشه اندازه گیری شد. برای اندازه گیری وزن خشک ریشه، در زمان برداشت ریشه های هر تیمار به صورت جداگانه شسته شدند و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد خشک و با ترازوی دقیق دیجیتالی اندازه گیری شدند.

۲-۳. اندازه گیری محتوای نسبی آب برگ

بعد از اعمال تیمارها، حدود ۰/۱ گرم نمونه برگ از قسمت میانی برگ های تازه از طریق توزین جدا و به عنوان وزن تر (Wf) برگ در نظر گرفته شد. در ادامه، نمونه برگ به مدت ۱۲ ساعت در آب مقطر قرار داده شد و بعد از خارج کردن از آب و خشک کردن سطح برگ، مجدداً توزین و به عنوان وزن اشباع (Wt) ثبت گردید. سپس در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه قرار داده شد تا خشک شود. در نهایت، وزن خشک (Wd) پس از قرار گرفتن در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد تا زمانی که به وزن ثابتی برسد اندازه گیری شد. در نهایت، محتوای نسبی آب (RWC) برگ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (Li, 2003).

$$RWC = [(Wf - Wd) / (Wt - Wd)] \times 100 (\%) \quad (\text{رابطه ۱})$$

۲-۴. اندازه گیری محتوای پرولین، فعالیت آنزیم پراکسیداز، محتوای کلروفیل، پروتئین ها و قندهای محلول

به منظور اندازه گیری مقدار پرولین برگ، فعالیت آنزیم پراکسیداز، میزان پروتئین های محلول برگ و محتوای کلروفیل، ده روز پس از محلول پاشی و اعمال تیمارها، بین ساعت ۹:۳۰ تا ۱۱:۰۰ صبح نمونه برداری از برگ های جوان و کاملاً توسعه یافته بالای (دوم و سوم) انجام شد. نمونه ها با فاصله در ازت مایع قرار داده و به فریزر ۴۰- درجه سانتی گراد منتقل شدند. محتوای پرولین مطابق روش (Bates et al., 1973)، فعالیت آنزیم پراکسیداز با روش (Zhang et al., 2004) و محتوای کلروفیل طبق روش (Lichtenthaler & Wellburn, 1983) اندازه گیری شد. برای اندازه گیری محتوای پروتئین های محلول از روش (Bradford, 1976)، و برای تعیین محتوای قندهای محلول از روش (Wang et al., 2003) استفاده شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش.

Soil Texture	pH	OC (g kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)
sandy-loamy	7.23	0.88	0.12	0.02	0.04

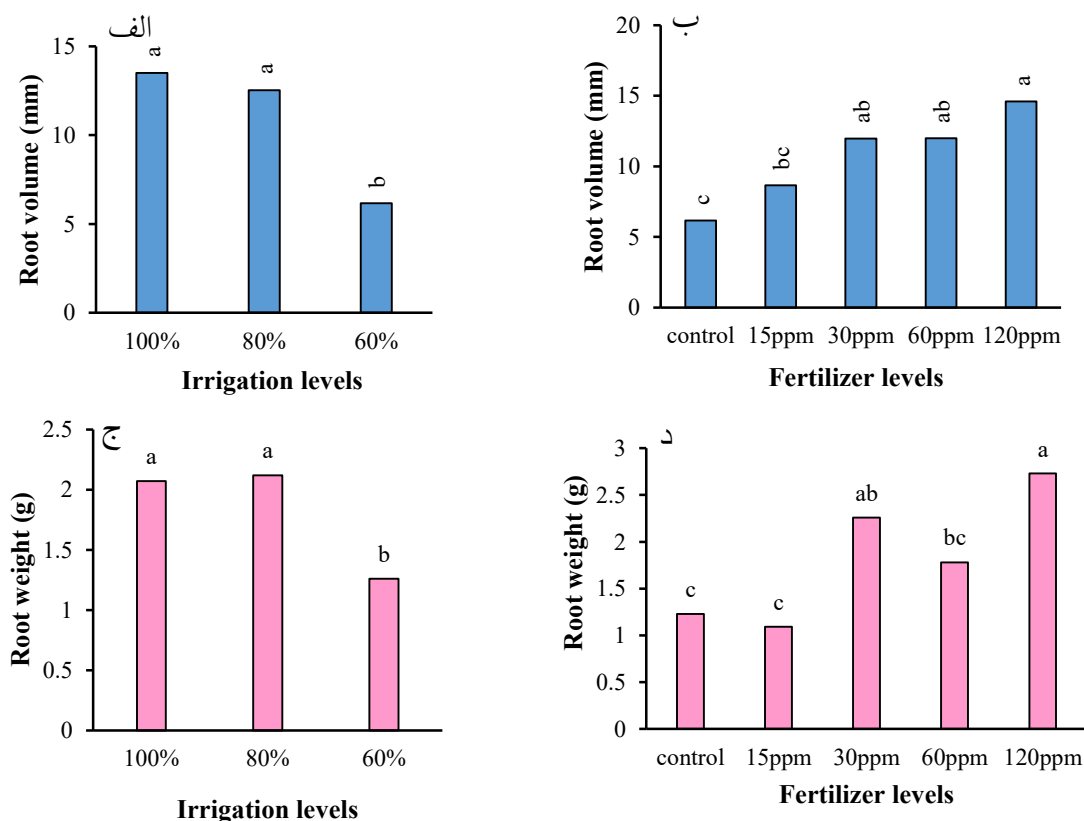
در نهایت، تجزیه واریانس داده ها به کمک نرم افزار SAS و مقایسه میانگین ها به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. رسم نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel انجام گرفت.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. حجم و وزن خشک ریشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، حجم و وزن ریشه تحت تاثیر اثرات ساده آبیاری و کاربرد نانوکود پالونیا قرار گرفتند (جدول ۲). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در بین تیمارهای مختلف آبیاری، بیشترین حجم و وزن خشک ریشه در تیمار آبیاری کامل و ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به دست آمد. با اعمال تنش خشکی به میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، کمترین حجم و وزن خشک ریشه حاصل شد (شکل ۱ الف و ج). ریشه یکی از اندام‌های رویشی مهم گیاهان است که از بخش‌های هوایی گیاه حمایت می‌کند و آب و عناصر معدنی لازم برای بقای گیاه را جذب می‌کند (Du et al., 2020). تصور می‌شود که شرایط خشکی تخصیص مواد جذب شده از اندام‌های فتوسنتزی مانند برگ‌ها را به اندام‌های هتروتروف مانند ریشه‌ها و دانه‌ها (مخازن) تغییر می‌دهد که باعث افزایش بقا در محیط‌های نامساعد می‌شود (Rich & Watt, 2013).

توانایی گیاه در تغییر توزیع ریشه خود برای بهره‌برداری از آب ذخیره شده در خاک ممکن است مکانیسم مهمی برای جلوگیری از تنش خشکی باشد (Wright & RCN, 1994). ریشه‌زایی عمیق، طول ریشه، تراکم و توزیع ریشه به عنوان صفات سازگار با تنش خشکی شناسایی شده است (Matsui & Singh, 2003; Taiz & Zeiger, 2006) که می‌تواند به عنوان معیار انتخاب مقاومت به خشکی در گیاهان مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات مختلف نشان داده است که تنش خشکی باعث کاهش طول و حجم ریشه، همچنین کاهش شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی می‌گردد (Ohashi et al., 2006; Mejia et al., 2000; Hosseini et al., 2017).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف آبیاری و محلول پاشی نانوکود پالونیا بر حجم (الف و ب) و وزن خشک ریشه (ج و د) گیاه سویا.

در بین تیمارهای مختلف محلول پاشی با نانوکود پالونیا، غلظت ۱۲۰ پی پی ام نانوکود بیشترین حجم و وزن خشک ریشه را ایجاد کرد که به لحاظ حجم ریشه با تیمار محلول پاشی ۶۰ و ۳۰ پی پی ام نانوکود و از نظر وزن خشک ریشه با غلظت ۳۰ پی پی ام نانوکود تفاوت معنی داری نداشت. کمترین حجم و وزن خشک ریشه نیز به تیمار شاهد و محلول پاشی با ۱۵ پی پی ام نانوکود اختصاص یافت (شکل ۱ ب و د). نتایج مطالعه‌ای نشان داد که در سویای محلول پاشی شده با نانو اکسید گرافن، طول کل ریشه، سطح ریشه، قطر ریشه و حجم ریشه به ترتیب ۳۳، ۳۸، ۳۴ و ۳۵ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش یافت (Zhao et al., 2022). مطالعات نشان داده است که تیمار نانو اکسید گرافن در غلظت‌های کم تأثیر مثبتی بر جوانه زنی و رشد ریشه و اندام هوایی گیاه داشته است (Zhao et al., 2015). طبق گزارش Siddiqi & Husen (2017) نانو اکسید گرافن به طور قابل توجهی بر جوانه زنی بذر، طول ریشه، تعداد برگ، طول ساقه، ارتفاع بوته، محتوای کلروفیل، فعالیت آنزیمی و ترکیب اسید آمینه تأثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه ذرات نانوکود به دلیل اندازه کوچک، به میزان بیشتر و به طور سریعتری توسط گیاه جذب می‌شوند، سرعت رشد گیاه را افزایش می‌دهند (Guru et al., 2015) که احتمالاً این امر به تحریک رشد ریشه برای جذب بیشتر عناصر غذایی خاک و در نهایت، رشد مضاعف بخش‌های مختلف گیاه منجر خواهد شد.

۳-۲. محتوای نسبی آب برگ

وضعیت آب گیاه به طور مستقیم بر فرآیندهای متابولیکی و بنابراین رشد گیاه تأثیر می‌گذارد. محتوای نسبی آب (RWC) برگ یکی از پارامترهای مهم محتوای آب گیاه است که ارتباط نزدیکی با مقاومت به خشکی در گیاه دارد (Dong et al., 2019). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از معنی دار بودن اثرات ساده آبیاری و محلول پاشی نانوکود در سطح احتمال یک درصد بر محتوای نسبی آب برگ سویا بود (جدول ۲).

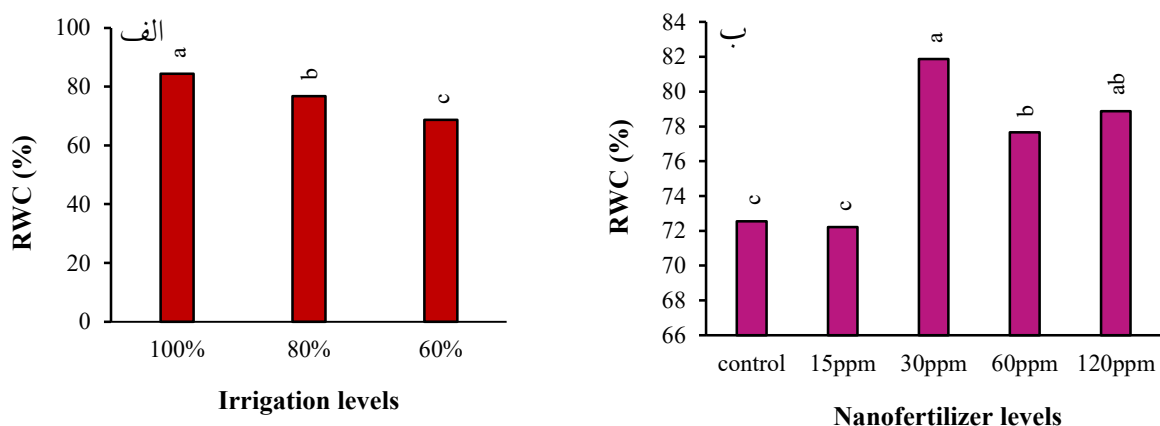
همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد، سطوح مختلف آبیاری و همچنین مقادیر مختلف نانوکود اثر معنی داری بر محتوای نسبی آب برگ داشتند؛ به طوری که در آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار آبیاری کامل ۲۲/۸ و نسبت به آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک حدود ۱۲ درصد کاهش نشان داد (شکل ۲ الف). نتایج مطالعات Dong et al. (2019) نشان داد که اعمال تنش خشکی در هر مرحله از رشد گیاه سویا محتوای نسبی آب را کاهش داد و با افزایش شدت و طول مدت تنش، این پارامتر به میزان بیشتری کاهش یافت.

در بین تیمارهای محلول پاشی، غلظت ۳۰ پی پی ام نانوکود، بیشترین محتوای نسبی آب (۸۱/۸۸ درصد) را دارا بود که از این نظر با غلظت ۱۲۰ پی پی ام در یک گروه آماری قرار گرفت. کمترین محتوای نسبی آب برگ به تیمار محلول پاشی با آب مقطر (شاهد) و محلول پاشی با غلظت ۱۵ پی پی ام نانوکود اختصاص یافت (شکل ۲ ب). علت این افزایش را شاید بتوان به افزایش حجم ریشه (شکل ۱ ب) در تیمارهای فوق نسبت داد که سبب جذب آب بیشتری از خاک می‌شود. در تحقیقی روی گیاه سویا، محتوای نسبی آب ساقه‌ها و برگ‌های گیاهان تیمار شده با نانو اکسید گرافن به ترتیب ۱۲۷ و ۱۲۸ درصد بیشتر از گیاهان تیمار نشده بود (Zhao et al., 2022).

جدول ۲. تجزیه واریانس مقادیر برخی صفات گیاه سویا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و غلظت‌های مختلف نانو کود پالونیا.

S.O.V	DF	Mean Square (M.S)											
		Root volume	Root weight	RWC	Proline	POD activity	Soluble carbohydrates in water	Soluble carbohydrates in alcohol	Soluble proteins	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Total chlorophyll	Grain Yield in pot
Block (Repeat)	2	9.06 ^{ns}	0.33 ^{ns}	11.62 ^{ns}	0.0026 ^{ns}	0.036 ^{ns}	4.52 ^{ns}	4.51 ^{ns}	0.205 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.036 ^{ns}	1.57 ^{**}	0.00098 ^{ns}
Irrigation (I)	2	233 ^{**}	3.52 [*]	920 ^{**}	0.001 ^{ns}	0.16 ^{**}	580 ^{**}	485.5 ^{**}	5.27 ^{**}	1137.3 ^{**}	1.51 ^{**}	11.74 ^{**}	3.01 ^{**}
Nano-fertilizer (NF)	4	96 [*]	4.26 ^{**}	157 ^{**}	0.0058 ^{**}	0.079 [*]	269 ^{**}	278 ^{**}	0.124 ^{ns}	366.3 ^{**}	9.32 ^{**}	3.73 ^{**}	0.81 ^{**}
I×NF	8	26.4 ^{ns}	0.68 ^{ns}	16.02 ^{ns}	0.0069 ^{**}	0.099 ^{**}	300 ^{**}	315 ^{**}	8.20 ^{**}	306.9 ^{**}	3.81 ^{**}	1.10 ^{**}	0.13 ^{**}
Error	28	27.9	0.71	13.95	0.001	0.021	7.76	7.77	0.114	12.24	0.1	0.27	0.020
CV (%)		49	46	4.8	25	20.4	16.7	16.7	9.1	12.22	8.01	14.52	10.97

^{ns}, ^{*}, ^{**} Non-significant and significant at 5 and 1 percent probability levels, respectively.

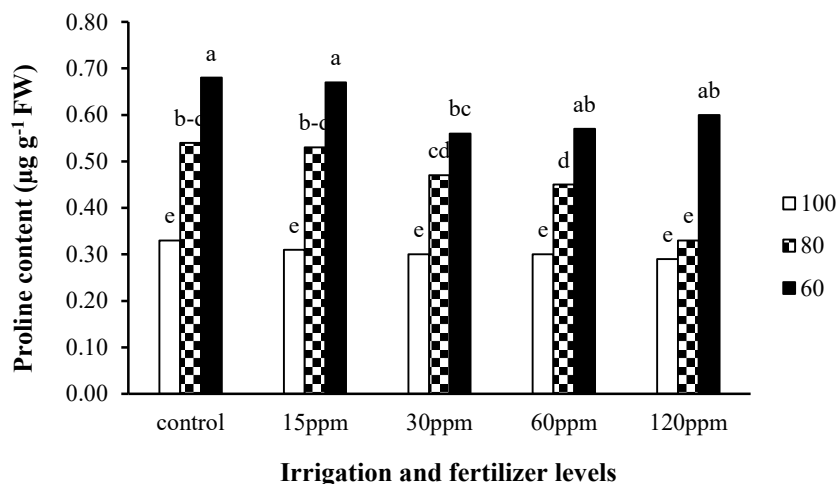


شکل ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف آبیاری (الف) و مقادیر مختلف محلول پاشی نانوکود پالونیا (ب) بر محتوای نسبی آب برگ گیاه سویا.

۳-۳. محتوای پرولین

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بیانگر اثر معنی‌دار آبیاری و اثر متقابل آبیاری × محلول پاشی نانوکود در سطح احتمال یک درصد بر محتوای پرولین سویا بود (جدول ۲). مطالعه حاضر نشان داد که در تمام سطوح محلول پاشی، تنش خشکی باعث افزایش معنی‌دار محتوای پرولین گردید و در تمامی تیمارهای مصرف نانوکود، بیشترین محتوای پرولین در سطح آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک مشاهده شد (شکل ۳). تیمار شاهد و محلول پاشی با ۱۵ پی‌پی‌ام نانوکود در این سطح آبیاری، بیشترین مقدار پرولین را در بین تیمارهای مورد مطالعه دارا بودند و با تیمارهای محلول پاشی با ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود در یک سطح آماری قرار گرفتند. در بالاترین سطح پرولین (آبیاری به میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و عدم محلول پاشی)، مقدار پرولین حدود ۵۵ درصد نسبت به شاهد بدون کود تحت آبیاری کامل افزایش پیدا کرد. مقایسه میانگین‌ها حاکی از این است که در شرایط آبیاری کامل که کمترین محتوای پرولین در گیاه تولید شد تفاوتی بین غلظت‌های مختلف کاربرد نانوکود با شاهد وجود نداشت. در شرایط کمبود آب، کاربرد نانوکود به‌ویژه در غلظت‌های بالا باعث کاهش قابل توجه محتوای پرولین در سویا شد؛ اگرچه این کاهش در تیمار تنش شدید خشکی معنی‌دار نگردید. به‌طور کلی، تأثیر تیمارهای آبیاری بر محتوای پرولین گیاه نسبت به غلظت‌های مختلف کاربرد نانوکود بسیار چشمگیرتر بود.

در تحقیق حاضر، افزایش پرولین به دلیل کاهش قابل توجه محتوای نسبی آب برگ (شکل ۲) صورت گرفت، زیرا پرولین با تنظیم اسمزی درون سلولی به حفظ آب سلول‌ها کمک می‌کند (Krüger, 2002). علاوه بر این، افزایش محتوای پرولین می‌تواند به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای باشد که تجمع ABA را افزایش می‌دهد و به نوبه خود به تنظیم بالای P5CS (دلتا پیروپولین ۵ کربوکسیلاز سنتتاز) و سنتز پرولین منجر می‌شود. از طرف دیگر، افزایش تجزیه یا کاهش سنتز پروتئین می‌تواند از دلایل تجمع پرولین باشد (Yang et al., 2009). افزایش تجمع پرولین در تنش خشکی به‌طور گسترده‌ای در گیاهانی مانند چغندر قند و سویا مشاهده گردیده است (Krüger, 2002; Putnik-Delic et al., 2012). پرولین می‌تواند در پتانسیل اسمزی برگ و در نتیجه تنظیم اسمزی نقش داشته باشد، بنابراین غلظت بالاتر پرولین تحت تنش برای گیاهان مطلوب است. گزارش‌های زیادی وجود دارد که پرولین علاوه بر نقش اسمولیت، می‌تواند نقش محافظت از آنزیم‌ها و افزایش پایداری غشاء تحت شرایط مختلف را نیز ایفا کند (Nagesh & Devaraj, 2008).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانو کود پالونیا بر محتوای پرولین در برگ سویا.

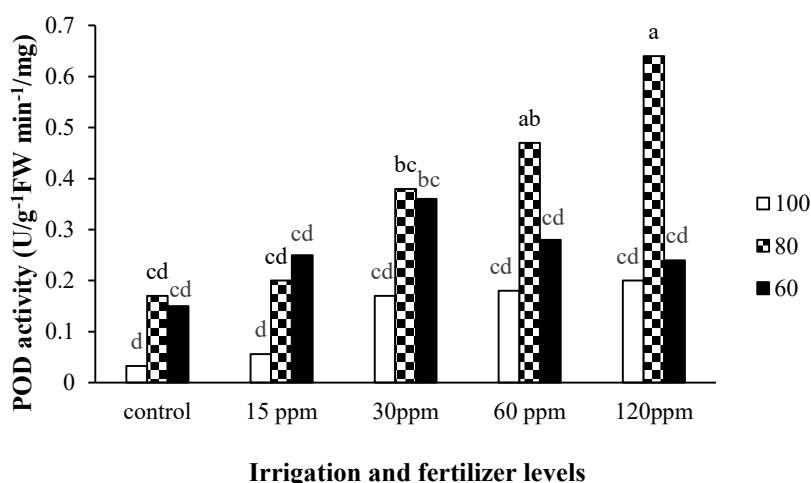
تولید اسمولیت‌هایی مانند پرولین و قندهای محلول به دلیل تنظیم بالادستی در مسیر بیوسنتز آنها در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد زیرا پرولین نقش مهمی در حفظ ساختار پروتئین‌ها، وضعیت آب سلولی و حفاظت از غشاء در شرایط تنش ایفا می‌کند (Gohari *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). در مطالعه ما، تأثیر مثبت نانو کود پالونیا در کاهش محتوای پرولین را می‌توان به تأثیر این کود در بهبود حجم و وزن خشک ریشه، افزایش جذب آب و به تبع آن بهبود محتوای نسبی آب برگ و در نتیجه، کاهش تنش خشکی نسبت داد. نتایج ما با نتایج تحقیقات (Sahitya *et al.*, 2018) مطابقت داشت. این محققان اعلام کردند که کود نانو می‌تواند با تنظیم اسمزی، آسیب ناشی از تنش خشکی را بهبود یا کاهش دهد، اما کاربرد نانو کود نمی‌تواند به‌طور کامل از اثرات تنش شدید خشکی بر گیاه جلوگیری نماید.

۳-۴. فعالیت آنزیم پراکسیداز

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، فعالیت آنزیم پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر برهمکنش سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف محلول‌پاشی نانو کود پالونیا قرار گرفت (جدول ۲). با بروز تنش خشکی و محلول‌پاشی کود نانو میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در برگ‌ها افزایش یافت، به‌طوری‌که حداکثر فعالیت این آنزیم در تیمار تنش متوسط با محلول‌پاشی ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانو کود مشاهده گردید که با تیمار محلول‌پاشی ۶۰ پی‌پی‌ام در همان سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۴). با افزایش شدت تنش (تنش شدید)، افزایش غلظت کاربرد نانو کود تا ۳۰ پی‌پی‌ام موجب افزایش میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز گردید و غلظت‌های بالاتر نانو کود در چنین شرایطی موجب کاهش فعالیت آنزیم شد (شکل ۴). علت کاهش آنزیم پراکسیداز در تیمار آبیاری به میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش شدید خشکی) در مقایسه با تیمار آبیاری ۸۰ درصد ظرفیت زراعی خاک، احتمالاً به این دلیل بوده است که گیاه در این سطح از تنش خشکی یا قادر به افزایش بیشتر فعالیت این آنزیم نبوده است و یا احتمالاً گیاه همزمان با افزایش فعالیت این آنزیم، مکانیزم‌های محافظتی دیگری مانند افزایش محتوای آنتی‌اکسیدان‌های غیر آنزیمی از جمله پرولین را در مقابله با تنش خشکی به‌کار گرفته است.

همان‌طوری که در تحقیق حاضر ملاحظه شد تنش خشکی باعث ایجاد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌شود. حضور طولانی مدت این گونه‌های فعال باعث مرگ سلول می‌شود. سیستم آنتی‌اکسیدانی می‌تواند گونه‌های فعال اکسیژن را به‌طور فعال، کنترل و از بین ببرد. PODها گروهی از آنزیم‌ها هستند که اکسید شدن بسیاری از سوبستراها را کاتالیز می‌کنند (Asada, 1987). افزایش فعالیت این آنزیم‌ها، سطح ROS را کاهش می‌دهد که یک روش مؤثر برای افزایش تحمل به خشکی است. در تأیید نتایج تحقیق حاضر، نتایج مطالعه‌ای نشان داد که قرار گرفتن گیاه سویا در معرض تنش خشکی موجب افزایش فعالیت پراکسیداز گردید (Wu *et al.*, 2019).

در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری، در تمام سطوح محلول پاشی کمترین میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز مشاهده گردید هر چند مقداری افزایش، با افزایش غلظت محلول پاشی با کود نانو مشاهده شد (شکل ۴). فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POD) و آسکوربات پراکسیداز (APX) در سویای محلول پاشی شده با نانو اکسید گرافن ۲۹، ۵۷، ۲۸ و ۶۶ درصد افزایش یافت (Zhao *et al.*, 2022). ذرات نانوکود می‌توانند به دیواره‌های سلولی گیاهان نفوذ کنند و به مواد مغذی اجازه دهند سریعتر به سیستم ریشه و سایر قسمت‌های گیاه برسند. علاوه بر این، نانوکودها ممکن است به گیاهان کمک کنند تا عوامل تنش‌زای محیطی مانند خشکی یا دمای شدید را بهتر تحمل کنند. به عنوان مثال، نانوکودها می‌توانند مواد مغذی ضروری را فراهم کنند که به گیاهان کمک می‌کنند علیرغم کمبود آب یا امواج گرما سالم بمانند. همچنین، نانوکودها می‌توانند موجب تولید ترکیبات محافظتی مفیدی مانند آنتی‌اکسیدان‌ها شوند که به گیاه کمک می‌کند تا با تنش‌های محیطی مقابله نماید (Yadav *et al.*, 2023). این اثرات می‌توانند انعطاف‌پذیری محصول را در برابر تنش بهبود بخشند و در نتیجه، عملکرد و کیفیت محصول را افزایش دهند. مشابه با نتایج تحقیق حاضر در مطالعه‌ای، محلول پاشی نانوکود کیتوزان - سیلیس ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه ذرت را بهبود بخشید، محتوای کلروفیل را افزایش داد و به بهبود رشد و عملکرد گیاه منجر شد (Ding *et al.*, 2023). همچنین در تحقیقی روی بادامزمینی مشخص گردید که میزان قندهای محلول و پرولین در شرایط کمبود آب در گیاه افزایش می‌یابد و کاربرد نانو کودهای روی و آهن باعث افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و همچنین افزایش سطح برگ شد (Fatollahpour Grangah *et al.*, 2020).

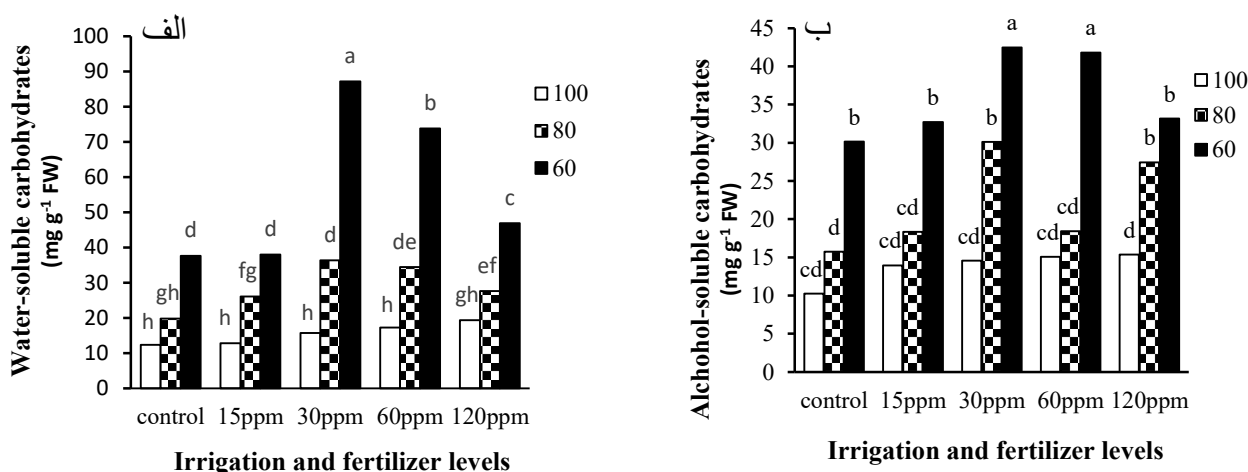


شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف محلول پاشی نانوکود پالونیا بر فعالیت آنزیم پراکسیداز در برگ سویا.

۳-۵. قندهای محلول در آب و الکل

مطابق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده آبیاری و اثر متقابل آبیاری × محلول پاشی در سطح احتمال یک درصد بر محتوای قندهای محلول در آب و الکل معنی‌دار بود (جدول ۲). همچنین اثر ساده محلول پاشی نیز بر محتوای قندهای محلول در الکل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، قندهای محلول در آب و الکل پاسخ مشابهی را به تمام غلظت‌های نانوکود مورد مطالعه در سطوح آبیاری نشان دادند. در تحقیق حاضر، تنش خشکی در همه سطوح محلول پاشی باعث افزایش محتوای قندهای محلول در آب و الکل گردید. برای مقابله با کمبود آب، تنظیم اسمزی گیاهان تحت تنش از طریق افزایش محتوای قندهای ریشه و برگ حفظ می‌شود و رشد نسبتاً بیشتری در ریشه در مقایسه با اندام‌های هوایی در گیاهانی که قبلاً تحت تنش خشکی قرار داشتند مشاهده شده است (Miranda *et al.*, 2021). پایین‌ترین مقدار قندهای محلول در آب و الکل به تیمار آبیاری کامل تعلق داشت و در این سطح آبیاری بین غلظت‌های محلول پاشی نانوکود تفاوتی مشاهده نشد. در مجموع با افزایش شدت تنش خشکی، اثرات نانوکود بر افزایش محتوای قندهای محلول بیشتر آشکار شد و بیشترین محتوای قندهای محلول

در آب به تیمار آبیاری ۶۰٪ و استفاده از ۳۰ پی پی ام نانوکود و بالاترین مقدار قندهای محلول در الکل به تیمارهای ۳۰ و ۶۰ پی پی ام در همین سطح آبیاری اختصاص پیدا کرد. استفاده از نانوکود ZnO-N باعث افزایش فعالیت آنزیمهای دخیل در متابولیسم کربوهیدراتها و به تبع آن، افزایش تولید کربوهیدراتها در گیاه گردید (Sun *et al.*, 2021). غلظت بالای کربوهیدراتها باعث کاهش خسارت‌های اکسیداتیو و حفظ ساختار پروتئین در طی کمبود آب می‌شود. به نظر می‌رسد که برخی از نانو کودها با کاهش تنش اکسیداتیو و حفاظت از غشاهای کلروپلاستی، سلولی و حفاظت از ماکرومولکول‌هایی، نظیر پروتئین‌ها، موجب افزایش میزان قندهای موجود در گیاهان می‌شوند و قندها علاوه بر نقش‌های اصلی خود، در تنظیم، اسمزی به گیاهان کمک می‌کنند (Khodary, 2004)؛ این مسأله می‌تواند اثرات مثبتی بر رشد و نمو گیاه داشته باشد.

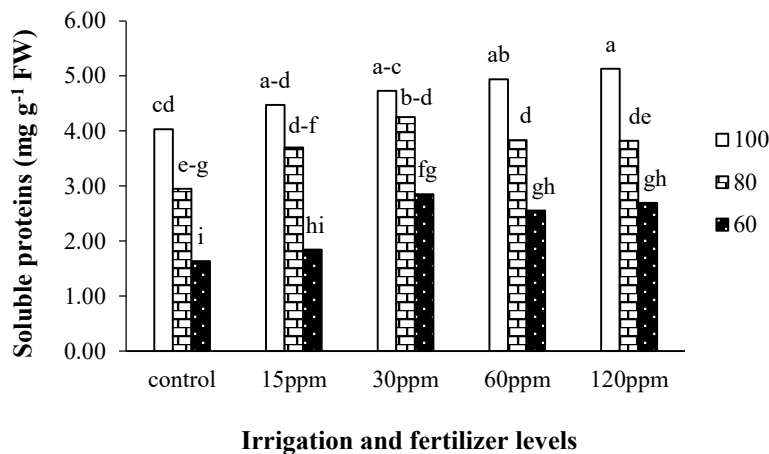


شکل ۵. اثر سطوح مختلف آبیاری و محلول‌پاشی با نانوکود بر کربوهیدرات‌های محلول در آب (الف) و الکل (ب) در گیاه سویا.

۳-۶. محتوای پروتئین‌های محلول برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از معنی‌دار بودن اثرات ساده آبیاری و محلول‌پاشی نانوکود در سطح احتمال یک درصد بر محتوای پروتئین‌های محلول برگ سویا بود (جدول ۲). نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل تیمارهای مختلف آبیاری و مقادیر مختلف محلول‌پاشی نانوکود بر محتوای پروتئین‌های محلول در برگ سویا تأثیر معنی‌داری داشت (شکل ۶). اعمال تنش خشکی باعث کاهش معنی‌دار محتوای پروتئین‌های محلول در برگ گردید و با افزایش شدت تنش، این کاهش شدیدتر بود؛ به طوری که کمترین مقدار این صفت در همه سطوح محلول‌پاشی به گیاهان تحت تیمار تنش خشکی به میزان ۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک اختصاص پیدا کرد.

در این سطح آبیاری، تیمار شاهد (بدون کاربرد نانوکود) کمترین مقدار را به خود اختصاص داد و با گیاهان تحت تیمار محلول‌پاشی با ۱۵ پی پی ام نانوکود در یک گروه آماری قرار گرفت. همچنین، مقایسات میانگین نشان می‌دهد بالاترین مقدار این صفت در گیاهان تحت تیمار آبیاری کامل و محلول‌پاشی نانوکود به میزان ۱۲۰ پی پی ام (۵/۱۳ میلی‌گرم در گرم) به دست آمد که با بقیه تیمارهای محلول‌پاشی بجز شاهد در این سطح آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت و در یک گروه آماری قرار گرفتند. محتوای پروتئین، قندها و پروتئین‌های محلول ارتباط نزدیکی با مقاومت گیاه به تنش دارد. به طور کلی، این مواد در تنظیم اسمزی و پیشگیری از کم‌آبی در شرایط تنش خشکی نقش دارند. از طریق تنظیم محتویات آنها، مقدار پتانسیل آب در سلول‌ها برای حفظ فشار تورگر کاهش می‌یابد و بنابراین فعالیت‌های متابولیکی به صورت طبیعی انجام می‌شود (Dong *et al.*, 2019).

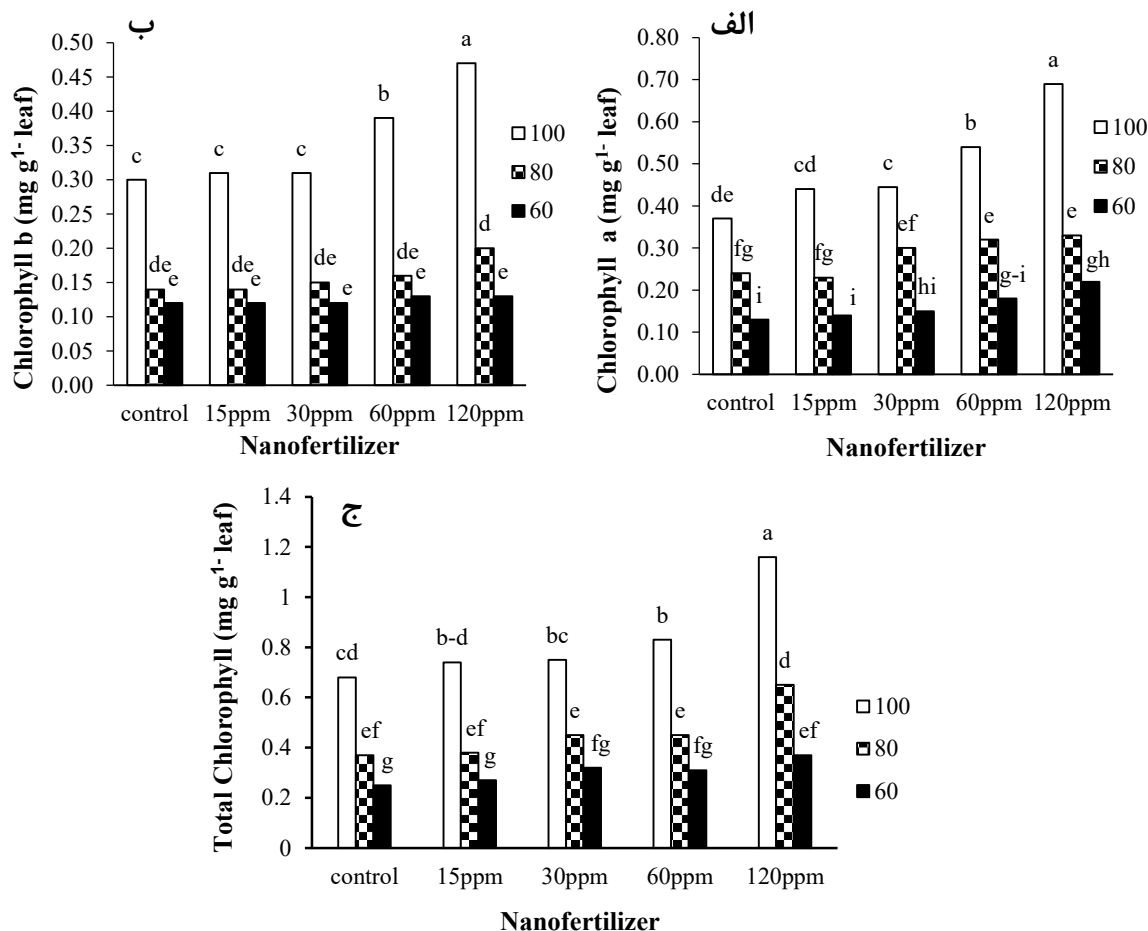


شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و مقادیر مختلف کاربرد نانوکود بر محتوای پروتئین‌های محلول در برگ سویا.

همان‌طوری که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد در همه سطوح آبیاری، کاربرد غلظت‌های مختلف نانوکود پالونیا باعث افزایش محتوای پروتئین‌های محلول برگ شد. بروز تنش خشکی در گیاهان، معمولاً به کاهش سنتز پروتئین و افزایش هیدرولیز آن منجر می‌شود که به تولید ترکیبات نیتروژن مانند اسیدهای آمینه محلول آزاد منتهی می‌شود (Rivas-Ubach *et al.*, 2014; Obata *et al.*, 2015). رویسکو یک آنزیم کلیدی در فرآیند جذب کربن است که حدود ۵۰ درصد پروتئین‌های محلول برگ را شامل می‌شود و مطابق نتایج به‌دست‌آمده، فعالیت و محتوای آن به‌طور قابل توجهی تحت تنش خشکی کاهش می‌یابد (Wang *et al.*, 2022). شاید بخشی از اثرات مثبت نانوکود پالونیا به تاثیر آن در بهبود رشد ریشه (شکل ۱) و بهبود وضعیت آب گیاه (شکل ۲) و کاهش اثرات تنش خشکی مربوط باشد. کاربرد نانوکودها به افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی و افزایش سنتز پروتئین‌های محلول در برگ منجر می‌شود. در تحقیقی، استفاده از نانو کود پالونیا در دو شرایط نرمال و تنش خشکی مقدار پروتئین‌های محلول برگ را به‌طور قابل توجهی افزایش داد (Sohrabi *et al.*, 2022). بهبود جذب مواد مغذی نانوکودها را می‌توان در رساندن مؤثر مواد مغذی به گیاهان دانست که می‌تواند به بهبود جذب و کاهش تلفات مواد مغذی کمک کند.

۳-۷. محتوای کلروفیل‌های a، b و کل

مطابق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، تمامی اثرات ساده و اثر متقابل دوگانه آبیاری × محلول پاشی بر محتوای کلروفیل‌های a، b و کل سویا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). همان‌طوری که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد محتوای کلروفیل‌های a، b و کل به شدت تحت تأثیر تنش خشکی و غلظت‌های مختلف محلول پاشی نانوکود قرار گرفتند. بروز تنش خشکی و افزایش شدت آن به‌طور قابل توجهی مقادیر کلروفیل‌های a، b و در نتیجه کلروفیل کل را کاهش داد، اگرچه این تفاوت‌ها در مواردی معنی‌دار نشد. مقایسات میانگین حاکی از این است که در همه سطوح کاربرد نانوکود، تنش شدید (۶۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) کمترین محتوای کلروفیل‌های a، b و کل را به خود اختصاص داد و این نشان می‌دهد که رنگیزه‌های فتوسنتزی به کاهش دسترسی به آب حساس هستند و وقوع تنش خشکی باعث بروز خسارت در کلروفیل می‌شود. در مطالعات دیگر نیز تنش خشکی، کلروفیل‌های a، b و محتوای کلروفیل کل را به میزان قابل توجهی کاهش داد (Wu *et al.*, 2019; Basal *et al.*, 2020). تنش خشکی فرآیند فتوسنتز را با تغییر محتوای کلروفیل و سایر رنگدانه‌های فتوسنتزی محدود می‌کند و در نتیجه، موجب توقف رشد گیاه می‌شود (Lee *et al.*, 2016). کلروفیل جزء مهم کمپلکس پروتئین-رنگدانه روی غشای تیلاکوئید است که برای فتوسنتز بسیار مهم است. محتوای کلروفیل تا حدی بیانگر میزان فتوسنتز گیاه بوده و می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر رشد گیاه تأثیرگذار باشد (Dong *et al.*, 2019). کاهش میزان کلروفیل نتیجه آسیب به غشاء و ساختار کلروپلاست و فتواکسیداسیون کلروفیل، افزایش فعالیت کلروفیل‌لاز و سرکوب بیوسنتز کلروفیل به دلیل کمبود آب است (Kabiri *et al.*, 2014).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح آبیاری و غلظت‌های مختلف کاربرد نانوکود پالونیا بر محتوای کلروفیل‌های a (الف) و b (ب) و کلروفیل کل در گیاه سویا.

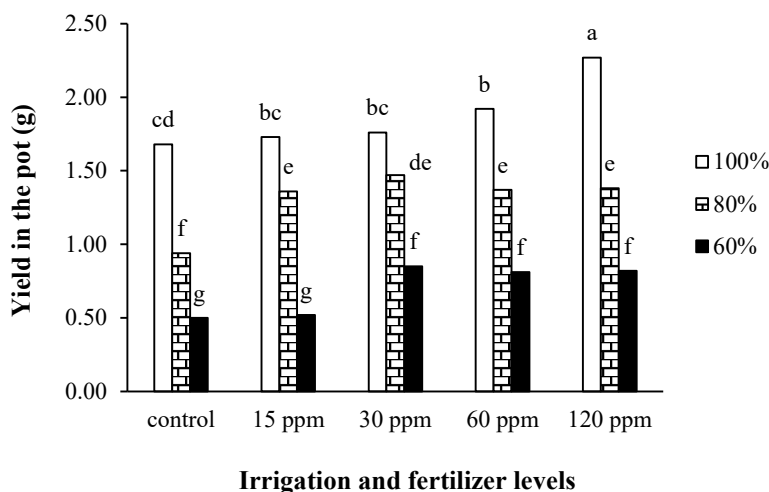
در تحقیق حاضر، بیشترین محتوای کلروفیل‌های a، b و کل به گیاهان تحت شرایط آبیاری کامل و تیمار محلول‌پاشی ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود پالونیا مربوط بود که تفاوت معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد. در گیاهان در معرض تنش شدید (۶۰٪ ظرفیت زراعی خاک)، تیمار محلول‌پاشی با ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود بالاترین مقدار کلروفیل کل را دارا بود که با تیمارهای محلول‌پاشی ۶۰ و ۳۰ پی‌پی‌ام در همین سطح آبیاری و تیمار ۱۵ پی‌پی‌ام نانوکود و تیمار شاهد در شرایط تنش متوسط (۸۰٪ ظرفیت زراعی خاک) در یک گروه آماری قرار گرفتند. اثرات مثبت نانوکود بر محتوای کلروفیل می‌تواند به دلیل افزایش سنتز پروتئین‌های محلول و کاهش تجزیه آنها به دلیل کاهش فعالیت پروتئولیتیک باشد. محلول‌پاشی نانوکودها ممکن است بهترین گزینه برای بهبود عملکرد در مناطق کم‌آب باشد، زیرا مقدار زیادی آب برای حل‌شدن و جذب کودهای سنتی توسط سیستم ریشه مورد نیاز است (Kumar *et al.*, 2023). در تحقیق حاضر، کاربرد نانوکود به واسطه بهبود رشد ریشه و توان گیاه در جذب آب (شکل ۱) باعث بهبود وضعیت آب گیاه (شکل ۲) و در نتیجه، کاهش تنش اکسیداتیو و کاهش آسیب به کلروفیل گردید.

۳-۸. عملکرد دانه در گلدان

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد عملکرد دانه در گلدان به وسیله اثر متقابل آبیاری و کاربرد نانوکود تحت تأثیر قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین تیمارها حاکی از آن است که در تمامی سطوح محلول‌پاشی، با کاهش مقدار آب آبیاری، عملکرد دانه در گلدان روند کاهشی نشان داد و کمترین مقدار این صفت در تمام سطوح نانوکود به گیاهان تحت تیمار تنش شدید خشکی اختصاص یافت. کاهش محتوای نسبی آب گیاه و به تبع آن، کاهش آماس سلولی، کاهش فتوسنتز به دلیل بسته‌شدن روزنه‌ها، آسیب به غشای سلولی و کاهش تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی، کاهش تولید و دژنره‌شدن پروتئین‌های محلول در برگ و همچنین

کاهش جذب عناصر غذایی می‌تواند از دلایل کاهش عملکرد دانه سویا در تحقیق حاضر باشد. غلاف‌دهی سویا حساس‌ترین مرحله رشد گیاه به تنش خشکی است و افزایش تنش خشکی، علاوه بر کاهش مواد فتوسنتزی، انتقال مواد مغذی به دانه‌ها را مختل می‌کند و در نتیجه، موجب کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Liu et al., 2019).

در تحقیق حاضر، بالاترین عملکرد دانه در گلدان (۲/۲۷ گرم) به گیاهان تحت شرایط آبیاری کامل و تیمار کاربرد ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود پالونیا مربوط بود که نسبت به گیاهان شاهد (بدون مصرف نانوکود) تحت شرایط تنش شدید خشکی که کمترین وزن دانه در گلدان (۰/۶۸ گرم) را داشتند، ۷۰ درصد افزایش عملکرد نشان داد. در همه سطوح آبیاری، کاربرد نانوکود به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر باعث افزایش معنی‌دار عملکرد دانه سویا گردید. کاربرد غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود پالونیا در گیاه سویا، عملکرد دانه را تحت شرایط تنش خشکی شدید به‌ترتیب حدود ۴۱، ۳۹ و ۳۸/۲ درصد نسبت به گیاهان تیمار نشده افزایش داد (شکل ۸). محققان اثرات مثبت نانوکود بر جوانه‌زنی، رشد و عملکرد گیاه را گزارش کرده‌اند. به عنوان مثال، افزایش جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه و بهبود بازده فتوسنتزی، زیست‌توده و پروتئین کل، قند، نیتروژن و ریز مغذی‌ها در گیاهان زراعی مختلف مثل سویا مشاهده شده است (Dimkpa et al., 2017; Dimkpa et al., 2019a). در تحقیق دیگری با کاربرد نانوکود روی، بیوماس اندام هوایی و ریشه در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافت (Moghaddasi et al., 2017). نانوکودها می‌توانند دسترسی سریع به مواد مغذی در مکان‌های رشد گیاه را افزایش دهند و در نتیجه، تولید کلروفیل، سرعت فتوسنتز و در نهایت رشد و نمو گیاهان را افزایش دهند (Babu et al., 2022).



شکل ۸. اثر سطوح مختلف آبیاری و محلول پاشی نانوکود بر عملکرد دانه سویا در گلدان.

۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه، نتایج مهمی را در مورد اثر نانوکود سبز سنتز شده از گیاه پالونیا بر کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه سویا ارائه می‌کند. غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام نانوکود پالونیا با افزایش وزن خشک و حجم ریشه و افزایش تنظیم اسمزی گیاه به‌واسطه افزایش محتوای کربوهیدرات‌های محلول باعث بهبود محتوای نسبی آب گیاه شد، همچنین فعالیت آنزیم پراکسیداز و محتوای پروتئین‌های محلول برگ را افزایش داد. نانوکود پالونیا نیز از طریق تأثیر بر وضعیت آب گیاه و بهبود مکانیسم‌های دفاعی گیاه، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه و به تبع آن، فتوسنتز و ماده‌سازی در گیاه را بهبود بخشید که در نهایت به افزایش عملکرد دانه سویا منجر شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محلول پاشی نانوکود کربن‌دار پالونیا در غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ پی‌پی‌ام می‌تواند در افزایش مقاومت گیاه سویا به تنش خشکی و افزایش عملکرد این گیاه و احتمالاً سایر گیاهان در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند بسیار مفید و قابل توصیه باشد؛ هر چند که بایستی مطالعات بیشتری در این زمینه صورت گیرد.

۵. منابع

- Ahmadi, M., & Souri, M.K. (2019). Nutrient uptake, proline content and antioxidant enzymes activity of pepper (*Capsicum annuum* L.) under higher electrical conductivity of nutrient solution created by nitrate or chloride salts of potassium and calcium. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 18(5), 13–22.
- Almaroai, Y.A., & Eissa, M.A. (2020). Role of marine algae extracts in water stress resistance of onion under semiarid conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1092-1101.
- Albanese, A., Tang, P.S., & Chan, C.W. (2012). The effect of nanoparticle size, shape and surface chemistry on biological systems. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 14, 1-16.
- Arya, H., Singh, M.B., & Bhalla, P.L. (2021). Overexpression of PIF4 affects plant morphology and accelerates reproductive phase transitions in soybean. *Food and Energy Security*, 10(3), 291.
- Asada, K. (1987). The water-water cycle in chloroplasts: Scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Annual Review of Plant Physiology*, 50, 601-639.
- Babu, S., Singh, R., Yadav, D., Rathore, S.S., Raj, R., Avasthe, R., & Singh, V.K. (2022). Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability. *Chemosphere*, 292, 133451.
- Basal, O., Szabó, A., & Veres, S. (2020). Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. *Current Plant Biology*, 22, p. 100135.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & Tear, I.B. (1973). Rapid determination of free proline for water- stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
- Bisht, S., Sharma, V., & Kumari, N. (2022). Biosynthesized hematite nanoparticles mitigate drought stress by regulating nitrogen metabolism and biological nitrogen fixation in *Trigonella foenum-graecum*. *Plant Stress*, 6, 100-112.
- 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(1-2), 248-254.
- Cotrim, M.F., Gava, R., Campos, C.N.S., de David, C.H.O., Reis, I.D.A., Teodoro, L.P.R., & Teodoro, P.E. (2021). Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(1), 34-43.
- Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S., Fugice, J., Agyin-Birikorang, S., Singh, U., & Hellums, D. (2017). Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean. *Agronomy for Sustainable Development*, 37, 1-13.
- Dimkpa, C.O., Singh, U., Bindraban, P.S., Adisa, I.O., Elmer, W.H., Gardea-Torresdey, J.L., & White, J.C. (2019). Addition-omission of zinc, copper, and boron nano and bulk oxide particles demonstrate element and size-specific response of soybean to micronutrients exposure. *Science of the Total Environment*, 665, 606-616.
- Ding, Y., Zhao, W., Zhu, G., Wang, Q., Zhang, P., & Rui, Y. (2023). Recent trends in foliar nanofertilizers: A review. *Nanomaterials*, 13(21), 2906.
- Di Sia, P. (2017). Nanotechnology among innovation, health and risks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 237, 1076-80.
- Dong, S., Jiang, Y., Dong, Y., Wang, L., Wang, W., Ma, Z., & Liu, L. (2019). A study on soybean responses to drought stress and rehydration. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(8), 2006-2017.
- Droppers, B., Supit, I., Van Vliet, M.T., & Ludwig, F. (2021). Worldwide water constraints on attainable irrigated production for major crops. *Environmental Research Letters*, 16(5), 055016.
- Du, Y., Zhao, Q., Chen, L., Yao, X., & Xie, F. (2020). Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean. *Agronomy*, 10, 302.
- Faostat (2022). *Crops and livestock products* [Online]. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Accessed 23, December 2023).
- Fatollahpour Grangah, M., Rashidi, V., Mirshekari, B., Khalilvand Behrouzgar, E., & Farahvash, F. (2020). Effects of nano-fertilizers on physiological and yield characteristics of pinto bean cultivars under water deficit stress. *Journal of Plant Nutrition*, 43, 2898-2910.
- Gill, S.S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–30.
- Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M.R., Fotopoulos, V., & Kimura, S., (2020). Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 10, 1-14.
- Guo, K., Hu, A., Wang, K., Wang, L., Fu, D., Hao, Y., & Tan, W. (2019). Effects of spraying nano-materials on the absorption of metal (loid) s in cucumber. *IET Nanobiotechnology*, 13(7), 712-719.
- Guru, T., Veronica, N., Thatikunta, R., & Reddy, S.N. (2015). Crop nutrition management with nano fertilizers. *Crop Nutrition Management with Nanofertilizers*, 1(1), 4-6.
- Gutiérrez-Ruelas, N.J., Palacio-Márquez, A., Sanchez, E., Muñoz-Márquez, E., CháVez-Mendoza, C., Ojeda-Barrios, D.L., & Flores-Cordova, M.A. (2021). Impact of the foliar application of nanoparticles, sulfate and

- iron chelate on the growth, yield and nitrogen assimilation in green beans. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(3), 12437-12437.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M.R., & Dexter, A.R. (2017). Effect of the fungus *Piriformospora indica* on physiological characteristics and root morphology of wheat under combined drought and mechanical stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 118, 107-120.
- Jin, Z., Zhuang, Q., Wang, J., Archontoulis, S.V., Zobel, Z., & Kotamarthi, V.R. (2017). The combined and separate impacts of climate extremes on the current and future US rainfed maize and soybean production under elevated CO₂. *Global Change Biology*, 23(7), 2687-2704.
- Kabiri, R., Nasibi, F., & Farahbakhsh, H. (2014). Effect of exogenous salicylic acid on some physiological parameters and alleviation of drought stress in *Nigella sativa* plant under hydroponic culture. *Plant Protection Science*, 50(1), 43-51.
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J.C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 532-540.
- Kiani, H., & Sohrabi, Y. (2022). The effect of katira on some morphophysiological characteristics and related to the seed yield of black seed plant (*Nigella sativa* L.) under dry conditions. *Journal of Horticultural Science*, 35(4), 631-645. (In Persian).
- Kumar, N., Samota, S.R., Venkatesh, K., & Tripathi, S.C. (2023). Global trends in use of nano-fertilizers for crop production: Advantages and constraints—A review. *Soil and Tillage Research*, 228, 105645.
- Khodary, S.E.A. (2004). Effect of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate metabolism in salt stressed maize plants. *International Journal of Agriculture and Biology*, 6, 5-8.
- Krüger, H.G. (2002). Separately and simultaneously induced dark chilling and drought stress effects on photosynthesis, proline accumulation and antioxidant metabolism in soybean. *Journal of Plant Physiology*, 159(10), 1077-1086.
- Lee, D.E., Ayoub, N., & Agrawal, D.K. (2016). Mesenchymal stem cells and cutaneous wound healing: Novel methods to increase cell delivery and therapeutic efficacy. *Stem Cell Research & Therapy*, 7, 1-8.
- Li, H. (2003). Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments. *Higher Education Press, Beijing*, pp. 191-205.
- Lichtenthaler, H.K., & Wellburn, A.R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591-592.
- Liu, Y., Ji, D., Turgeon, R., Chen, J., Lin, T., Huang, J., & Lv, Z. (2019). Physiological and proteomic responses of mulberry trees (*Morus alba* L.) to combined salt and drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(10), 2486.
- Matsui, T., & Singh, B.B. (2003). Root characteristics in cowpea related to drought tolerance at the seedling stage. *Experimental Agriculture*, 39(1), 29-38.
- Mejia, M.N., Madramootoo, C.A., & Broughton, R.S. (2000). Influence of water table management on corn and soybean yields. *Agricultural Water Management*, 46(1), 73-89.
- Miranda, M.T., Da Silva, S.F., Silveira, N.M., Pereira, L., Machado, E.C., & Ribeiro, R.V. (2021). Root osmotic adjustment and stomatal control of leaf gas exchange are dependent on citrus rootstocks under water deficit. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 11-19.
- Moghaddasi, S., Fotovat, A., Karimzadeh, F., Khazaei, H.R., Khorassani, R., & Lakzian, A. (2017). Effects of coated and non-coated ZnO nano particles on cucumber seedlings grown in gel chamber. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(8), 1108-1120.
- Morales-Díaz, A.B., Ortega-Ortíz, H., Juárez-Maldonado, A., Cadenas-Pliego, G., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2017). Application of nanoelements in plant nutrition and its impact in ecosystems. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 8(1), 1-13.
- Nagesh, B.R., & Devaraj, V.R. (2008). High temperature and salt stress response in French bean (*Phaseolus vulgaris*). *Australian Journal of Crop Science*, 2(2), 40-48.
- Obata, T., Witt, S., Lisec, J., Palacios-Rojas, N., Florez-Sarasa, I., Yousfi, S., & Fernie, A.R. (2015). Metabolite profiles of maize leaves in drought, heat, and combined stress field trials reveal the relationship between metabolism and grain yield. *Plant Physiology*, 169(4), 2665-2683.
- Ohashi, Y., Nakayama, N., Saneoka, H., & Fujita, K. (2006). Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. *Biologia Plantarum*, 50, 138-141.
- Putnik-Delić, M., Maksimović, I., Venezia, A., & Nagl, N. (2012). Free proline accumulation in young sugar beet plants and in tissue culture explants under water deficiency as tools for assessment of drought tolerance. *Romanian Agricultural Research*, 30, 141-148.
- Rich, S.M., & Watt, M. (2013). Soil conditions and cereal root system architecture: Review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1193-1208.

- Rivas-Ubach, A., Gargallo-Garriga, A., Sardans, J., Oravec, M., Mateu-Castell, L., Pérez-Trujillo, M., & Peñuelas, J. (2014). Drought enhances folivory by shifting foliar metabolomes in *Quercus ilex* trees. *New Phytologist*, 202(3), 874-885.
- Sahitya, U.L., Krishna, M.S.R., & Deepthi, R.S. (2018). Biochemical and physiological changes induced by water stress in hot pepper (*Capsicum annum* L.) genotypes. *Plant Cell Biotechnology & Molecular Biology*, 19, 179-195.
- Siddiqi, K.S., & Husen, A. (2017). Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 12, 1-18.
- Sohrabi, Y., Sharifi Kalyani, F., Heydari, M., Yazdani, M., Omer, K.M., & Yousefi, A.R. (2022). Plant-based nano-fertilizer prepared from *Paulownia tomentosa*: Fabrication, characterization, and application on *Ocimum basilicum*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1-13.
- Souri, M.K., & Bakhtiarizade, M. (2019). Biostimulation effects of rosemary essential oil on growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 243, 472-476.
- Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y., & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(2), 245-259.
- Suriadi, A., Zulhaedar, F., Nazam, M., & Hipi, A. (2021). Optimal irrigation at various soil types for soybean production. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental*, 648(1), p. 012081. IOP Publishing.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). Stress physiology. In: Taiz L, Zeiger E, editors. *Plant Physiology*. Sunderland: Academic, p. 671-81.
- Tang, Y., Sun, X., Wen, T., Liu, M., Yang, M., & Chen, X. (2017). Implications of peroxidase function in regulation of salicylic acid on soybean seedling photosynthetic performance under water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 19-28.
- Wang, X., Liu, Y., Li, H., Wang, F., Xia, P., Li, W., & Guo, Y.D. (2022). SISNAT2, a chloroplast-localized acetyltransferase, is involved in Rubisco lysine acetylation and negatively regulates drought stress tolerance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 105003.
- Wang, J.Y., Ao, H., Zhang, J., & Qu, G.Q. (2003). Experimental techniques and principles of plant physiology and biochemistry. Harbin, China: Northeast Forestry University Press. Search in.
- Wei, Y., Jin, J., Jiang, S., Ning, S., & Liu, L. (2018). Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei plain, China. *Agronomy*, 8(7), 97.
- Wright, G.C., & Rao, R.C.N. (1994). Peanut water relations. In: Smartt J, editor. The peanut crop. London: Chapman & Hall; p. 281-325.
- Wu, Yang, R., Wang, J., & Xiujian, G. (2019). Physiological response of flax seedlings with different drought-resistances to drought stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 34, 145-153.
- Yadav, A., Yadav, K., & Abd-Elsalam, K.A. (2023). Nanofertilizers: Types, delivery and advantages in agricultural sustainability. *Agrochemicals*, 2(2), 296-336.
- Yang, S.L., Lan, S.S., & Gong, M. (2009). Hydrogen peroxide-induced proline and metabolic pathway of its accumulation in maize seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 166(15), 1694-1699.
- Zhang, F., Yang, Y., He, W., Sun, F., & Zhang, L. (2004). Changes of antioxidant enzymes in wheat subjected to water deficit and rewatering. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24(2), 205-209.
- Zhang, Y., Liu, N., Wang, W., Sun, J., & Zhu, L. (2020). Photosynthesis and related metabolic mechanism of promoted rice (*Oryza sativa* L.) growth by TiO₂ nanoparticles. *Springer*, p. 14.
- Zhao, S.Q., Wang, Q.Q., Zhao, Y.N., Rui, Q., & Wang, D.Y. (2015). Toxicity and translocation of graphene oxide in *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 39, 145-156.
- Zhao, L., Wang, W., Fu, X., Liu, A., Cao, J., & Liu, J. (2022). Graphene oxide, a novel nanomaterial as soil water retention agent, dramatically enhances drought stress tolerance in soybean plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 810905.