

Original article

Effect of foliar application of different nano-selenium concentrations on quantitative and qualitative traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) under irrigated and rainfed conditions

Negin Momeni¹, Razieh Khalilzadeh^{2*}, Sajad Rahimi-Moghaddam³, Younes Kheirizadeh Arough³

1. Msc student, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
2. Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetic Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran
3. Department of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received 3 November 2024; Revised 5 January 2025; Accepted 7 January 2024

Extended abstract

Introduction

Water scarcity is one of the major constraints limiting crop production, particularly in cereal crops. Drought stress disrupts a wide range of molecular, biochemical, physiological, morphological, and quality-related processes in plants. Supplementary irrigation is an effective strategy to mitigate the adverse effects of drought stress in crops. Early application of supplementary irrigation during dry years or at critical growth stages can enhance yield stability. Among cereal crops, barley is considered the most adaptable species to biotic and abiotic stresses. Although barley shows relatively higher drought tolerance than many other cereals, it is still sensitive to water deficiency during critical growth stages, particularly stem elongation and grain filling. Drought occurring at these stages can cause substantial yield reductions. In recent decades, the adoption of innovative technologies to improve crop performance has increased markedly. Nanotechnology, particularly the application of nanofertilizers, has emerged as a promising strategy for enhancing agricultural productivity. As an efficient alternative to conventional fertilizers, nanotechnology can improve nutrient use efficiency while reducing environmental impacts. Selenium is a non-essential element for most plants but an essential micronutrient for animals and humans. Considering the increasing water scarcity in Iran, the importance of barley production, and the potential of nanotechnology to enhance crop performance, this study aimed to evaluate the effects of different nano-selenium concentrations on selected quantitative and qualitative traits of barley under rainfed and supplementary irrigation conditions.

Materials and methods

To evaluate the effects of foliar application of different nano-selenium concentrations on selected morpho-physiological traits and grain yield of barley under rainfed and supplementary irrigation conditions, a split-plot experiment based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications was conducted at the research farm of the Faculty of Agriculture, Lorestan University in 2023. The main plot factor was irrigation regime (rainfed and one-time supplementary irrigation at the grain-filling stage), and the subplot factor consisted of four nano-selenium concentrations (0, 10, 20, and 30 mg L⁻¹), applied at two growth stages (4–6 leaves and stem elongation). Leaf soluble sugars and proline content in leaves were determined at 490 nm and 520 nm, respectively, using a spectrophotometer. Grain protein content was measured using a Grain N Analyzer (Perten 7250,

* Corresponding author: Razieh Khalilzadeh; E-Mail: Khalilzadeh.r@lu.ac.ir



Sweden). Data were analyzed using the least significant difference (LSD) test at the 0.05 probability level to evaluate the main effects and interactions.

Results and discussion

Drought stress significantly reduced grain yield, carotenoid content, soluble sugars, number of grains per spike, and 100-grain weight, while increasing leaf proline and grain protein content. In contrast, foliar application of nano-selenium improved most of these traits and decreased electrical conductivity. The highest carotenoid ($3.87 \text{ mg.g}^{-1} \text{ FW}$) and soluble sugar content ($86.77 \text{ mg.g}^{-1} \text{ FW}$), as well as the highest 100-grain weight (4.8 g), were obtained under supplementary irrigation combined with foliar application of 20 mg L^{-1} nano-selenium. Additionally, the maximum proline content in leaves ($9.66 \text{ mg.g}^{-1} \text{ FW}$) and grain protein (13.75%) were recorded under rainfed conditions with 30 and 20 mg L^{-1} nano-selenium, respectively. The highest grain yield ($3357.58 \text{ kg.ha}^{-1}$) was obtained under supplementary irrigation with the application of 20 mg L^{-1} nano-selenium. Compared with the control, foliar application of 30 mg L^{-1} nano-selenium under rainfed conditions increased carotenoid content, proline, soluble sugars, grain protein, and grain yield by 51.9%, 9.6%, 27%, 3.8%, and 71.7%, respectively.

Conclusion

Overall, supplementary irrigation combined with foliar application of nano-selenium can mitigate the adverse effects of drought stress in barley. Therefore, the application of nano-selenium combined with supplementary irrigation at the grain-filling stage is recommended to enhance barley performance under water-limited conditions.

Keywords: Chlorophyll, Electrical conductivity, Proline, Rainfed, Soluble sugars

بررسی اثر محلول پاشی غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم بر برخی صفات کمی و کیفی جو (*Hordeum vulgare* L.) تحت شرایط با و بدون آبیاری تکمیلی

نگین مومنی^۱، راضیه خلیل‌زاده^{۲*}، سجاد رحیمی مقدم^۳، یونس خیری‌زاده آروق^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

۲. استادیار، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

۳. گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: پرولین قندهای محلول بدون آبیاری کلروفیل هدایت الکتریکی	به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی و عملکرد گیاه جو در شرایط با و بدون آبیاری تکمیلی، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان اجرا گردید. کرت‌های اصلی شامل آبیاری در دو سطح بدون آبیاری و آبیاری تکمیلی (در مرحله پرشدن دانه) و کرت‌های فرعی شامل محلول پاشی نانوآکسید سلنیوم در چهار غلظت (بدون محلول پاشی، ۱۰، ۲۰، ۳۰ میلی‌گرم در لیتر) بود. بالاترین محتوای کاروتنوئید و قندهای محلول (به ترتیب ۳/۸۷ و ۸۶/۷۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و وزن صد دانه (۴/۸ گرم) تحت شرایط آبیاری تکمیلی و محلول پاشی ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به دست آمد. از طرفی حداکثر محتوای پرولین (۹/۶۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و پروتئین دانه (۱۳/۷۵ درصد) به ترتیب در کاربرد ۳۰ و ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تحت شرایط بدون آبیاری مشاهده گردید. همچنین بیش‌ترین میزان عملکرد (۳۳۵۷/۵۸ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری تکمیلی و کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر حاصل شد. محلول پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تحت شرایط بدون آبیاری در مقایسه با عدم محلول پاشی محتوای کاروتنوئید، پرولین، قندهای محلول، پروتئین دانه و عملکرد را به ترتیب ۵۱/۹، ۹/۶، ۲۷، ۳/۸ و ۷۱/۷ درصد افزایش داد. بر اساس نتایج، انجام آبیاری تکمیلی و محلول پاشی نانوسلنیوم می‌تواند تا حدودی اثرات زیان‌بار ناشی از تنش خشکی را تعدیل نماید و بنابراین می‌توان کاربرد این کود و اعمال آبیاری تکمیلی را در جهت بهبود عملکرد و اجزای عملکرد جو تحت شرایط بدون آبیاری توصیه کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸ تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵ ۲۱۵-۲۰۵ (۱): ۱۹	

مقدمه

در نتیجه خسارت‌های ناشی از تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن کاهش پیدا می‌کند، کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان جنبه سازگاری دارد (Azmat et al., 2020). در بین غلات، جو وسیع‌ترین سازگاری را به تنش‌های زنده و غیرزنده دارد. از اینرو بخش اعظم کشت جو در مناطقی انجام می‌شود که به دلیل شرایط زراعی نامطلوب، برای سایر غلات مناسب نمی‌باشد (Chen et al., 2020). اگرچه جو نسبت به سایر غلات به تنش خشکی متحمل‌تر است، اما این گیاه در دوره رشد و نمو خود در دو مرحله ساقه رفتن،

کمبود آب مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید گیاهان زراعی از جمله غلات است. کشور ایران در منطقه آب و هوایی خشک قرار دارد و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۵۰ میلی‌متر (۷۰ درصد کمتر از میانگین جهانی) است. آکاش و همکاران (Akash et al., 2009) در بررسی عملکردهای ژنوتیپ جو در دو شرایط تنش و بدون تنش خشکی نشان دادند که تنش خشکی سبب کاهش ۱۹ تا ۴۵ درصدی عملکرد بیولوژیک و ۱۳ تا ۳۷ درصدی عملکرد دانه گردید. به دلیل اینکه مقدار الکترون‌های برانگیخته شده در طی فرآیند فتوسنتز کاهش و

(BBCH 14-16) و مرحله ساقه روی (BBCH 30-31) بود. زمین مورد نظر ابتدا شخم و دیسک زده شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به طول چهار متر و با فاصله بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۴۰۰ بذر در مترمربع بود. رقم جو مورد استفاده نادر در شهر خرم‌آباد بود که به صورت دستی در ۱۵ آبان‌ماه ۱۴۰۲ به صورت خشکه‌کاری کشت شد. در طول فصل رشد جهت مبارزه با علف‌های هرز از علف‌کش آتلاتتیس استفاده گردید. خاک مزرعه دارای بافت لومی رسی با درصد نیتروژن ۰/۱۱، میزان فسفر ۱۲/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم، میزان پتاسیم ۳۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، pH برابر ۷/۷۸ و شوری ۱/۴۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. ده روز پس از آبیاری تکمیلی در مرحله رسیدگی دانه (BBCH 83-85)، برگ پرچم‌های گیاه برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی برداشت شدند.

سنجش محتوای پرولین، قندهای محلول و پروتئین دانه

اندازه‌گیری قندهای محلول برگ به روش فنول سولفوریک و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (SHIMADZU UV-1800) در طول موج ۴۹۰ نانومتر صورت گرفت (Dubios et al., 1956). محتوای پرولین برگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد (Bates et al., 1973). برای اندازه‌گیری پروتئین دانه از دستگاه NIR Grain Analyzer (ساخت شرکت Perten سوئد مدل ۷۲۵۰) استفاده شد.

محتوای نسبی آب، نشت الکتریکی، کلروفیل کل و کارتنوئید

محتوای نسبی آب به روش (Chelah et al., 2011) اندازه‌گیری گردید. میزان نشت الکترولیت برگ پرچم به روش (Sairam and Srivastava, 2001) محاسبه شد. برای سنجش کلروفیل کل و کارتنوئید از روش آرنون (Arnon, 1949) استفاده شد. ۰/۲ گرم از بافت تازه برگ با استن ۸۰٪ به تدریج له گردید. پس از آن حجم نهایی با استن ۸۰٪ به ۲۰ میلی‌لیتر رسانده شد. پس از سانتریفوژ محلول حاصل در ۴۰۰ دور و به مدت ۱۰ دقیقه جذب نوری محلول بالای نمونه‌ها در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت گردید.

تشکیل و پر شدن دانه نسبت به کمبود آب حساس است و تنش خشکی در این مراحل منجر به کاهش عملکرد آن می‌شود (Habibi et al., 2013). کمبود منابع آبی و روش‌های آبیاری غیرمنطقی، عملکرد غلات را محدود کرده است. بنابراین، بررسی اقدامات مدیریتی برای صرفه جویی در مصرف آب و افزایش عملکرد در تولید غلات ضروری است (Zhang et al., 2023).

فناوری نانو به عنوان جایگزین مناسب کودهای شیمیایی، امکان استفاده از عناصر غذایی و کاهش هزینه‌های حفاظت از محیط زیست را فراهم کرده است (Babaei et al., 2017). نانومواد به دلیل تحرک بیشتر و بالا بودن نسبت سطح به حجم نسبت به عناصر معمولی، به راحتی می‌توانند وارد روزه‌های برگ گیاه شوند و رشد و فتوسنتز گیاهان را افزایش دهند (Zahedi et al., 2019). سلنیوم یکی از مواد مغذی غیرضروری برای اکثر گیاهان و به عنوان یک ریزمغذی ضروری برای حیوانات و انسان می‌باشد (Lanza and Reis, 2021). سلنیوم به عنوان یک کود جدید می‌تواند رشد گیاه را تقویت کند و عملکرد محصول را افزایش دهد (Hasanuzzaman et al., 2020). اثر مثبت سلنیوم بر رشد یا پارامترهای مربوط به عملکرد جو (Habibi et al., 2013)، کلزا (Badawy et al., 2017) و گندم (Wu et al., 2024) گزارش شده است. با توجه به موارد مطرح شده از جمله مشکل کم‌آبی و اهمیت جو در کشور و هم‌چنین لزوم استفاده از فناوری‌های جدید در بهبود کیفیت گیاهان از جمله فناوری نانو، این تحقیق با هدف بررسی نانوکود سلنیوم بر برخی خصوصیات کمی و کیفی جو در شرایط بدون آبیاری و آبیاری تکمیلی انجام گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب آزمایش اسپلیت پلات (کرت‌های خرد شده) بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان با طول جغرافیائی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه و عرض جغرافیائی ۳۲ درجه و ۳ دقیقه و ارتفاع ۱۱۱۷ متر از سطح دریا، در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ اجرا گردید. کرت‌های اصلی شامل آبیاری در دو سطح بدون آبیاری و آبیاری تکمیلی در مرحله پرشدن دانه (BBCH 71-73) و کرت‌های فرعی شامل محلول‌پاشی نانوآکسید سلنیوم در چهار غلظت (بدون محلول‌پاشی، ۱۰، ۲۰، و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر) در دو مرحله ۴-۶ برگ

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی کود بر تمام صفات مورد مطالعه و اثر اصلی آبیاری بر محتوای کلروفیل، کاروتنوئید، پرولین، فندهای محلول، تعداد دانه در سنبله، وزن صد دانه، عملکرد دانه و پروتئین معنی‌دار گردید. همچنین میزان کاروتنوئید، پرولین، فندهای محلول، تعداد دانه در سنبله، وزن صد دانه، محتوای پروتئین و عملکرد دانه تحت تأثیر اثر متقابل بین کود و آبیاری اختلاف معنی‌داری را نشان دادند (جدول ۱).

در پایان فصل رشد در اواخر خردادماه و در مرحله رسیدگی دانه (BBCH 99) پس از حذف بوته‌های حاشیه، از هر کرت یک مترمربع برداشت شد و صفات مورفولوژیک از ۵ بوته از هر واحد آزمایشی اندازه‌گیری گردید. وزن صد دانه و عملکرد دانه نیز در یک مترمربع از هر واحد آزمایشی (کرت) اندازه‌گیری گردید. برای تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و Excel استفاده شد و میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد مقایسه شدند.

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تیمارهای آبیاری و نانوسلنیوم بر برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک جو

Table 1. Analysis of variance (mean squares) of irrigation and nano-selenium on some morphological and physiological traits of barley

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	فندهای محلول Soluble sugars	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	محتوای نسبی آب Relative water content
Source of variations	df						
Block	2	44.98 **	2.7 **	23.42**	0.26 ns	101.6 **	385.92 **
Irrigation (I)	1	4.84 *	0.07 *	7.42*	18249.1**	11.09 ns	162.6 ns
Block (Irrigation)	2	0.05	0.001	0.09	0.78	73.46	130.84
Fertilizer (F)	3	68.04 **	0.88 **	1.05 **	91.44 **	191.01 **	208.3 *
I * F	3	0.52 ns	1 **	0.37 **	24.43 **	14.54 ns	11.72 ns
Error	12	0.34	0.01	0.009	1.25	7.11	35.36
C.V. %	-	4.72	3.82	1.12	2.1	3.63	7.77

Table 1. Continued

جدول ۱. ادامه

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته Plant height	تعداد سنبله در بوته Spikes per plant	طول سنبله Spike length	تعداد دانه در سنبله Grain per spike	وزن صد دانه 100-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	پروتئین دانه Grain protein
Source of variations	df							
Block	2	3.5**	0.37 ns	0.84**	2.54 ^{ns}	0.002 ^{ns}	7346.51 ns	43.66**
Irrigation (I)	1	0.16 ^{ns}	0.16 ns	0.01 ^{ns}	22.04*	2.1**	979841.2 ^{ns}	84.87*
Block (Irrigation)	2	0.16	0.04	0.01	0.79	0.01	49042.1	1
Fertilizer (F)	3	20.7**	9.5 **	0.07**	41.81 **	0.64**	1307205**	0.34**
I * F	3	0.5 ns	0.16 ^{ns}	0.01 ^{ns}	11.59*	0.19**	525833.9**	0.08**
Error	12	0.44	0.2	0.102	2.16	0.01	6259.88	0.002
C.V. %	-	0.64	14.04	6.62	6.78	3.26	2.86	0.46

* و ** به ترتیب گزارش‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ و ns فاقد اختلاف معنی‌دار

* and ** respectively, reporting significance at 5% and 1% probability level and ns. No significant difference

که در بیوسنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی دخیل هستند نسبت داده شود (Auobi Amirbad et al., 2020).

پرولین و قندهای محلول

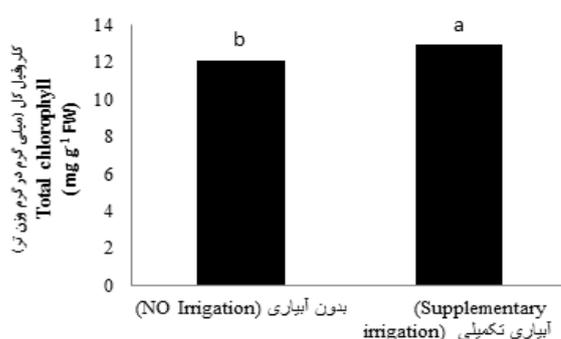
بالاترین محتوای پرولین تحت شرایط بدون آبیاری و محلول پاشی ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (۹/۶۶ میلی‌گرم در گرم وزن تر) به دست آمد (جدول ۳). محلول پاشی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تحت شرایط تنش خشکی در مقایسه با عدم مصرف نانوسلنیوم محتوای پرولین را به ترتیب ۰/۲، ۳/۸ و ۹/۶ درصد افزایش داد (جدول ۳). حداکثر محتوای قندهای محلول (۸۶/۷۷ میلی‌گرم در گرم وزن تر) با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تحت شرایط آبیاری تکمیلی حاصل شد (جدول ۳). تحت شرایط بدون آبیاری کاربرد ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در مقایسه با شاهد محتوای قندهای محلول را به ترتیب ۱۲/۶، ۱۷/۳ و ۲۷ درصد بهبود بخشید (جدول ۳). افزایش انباشت پرولین تحت شرایط تنش محدودیت آبی می‌تواند ناشی از تحریک تولید آن یا جلوگیری از تجزیه آن و یا تجزیه پروتئین‌ها باشد (Babaei et al., 2017). از اثرات تجمع پرولین در گیاه می‌توان به عنوان یک آنتی‌اکسیدان و هضم‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن و محافظت‌کننده پروتئین‌ها، غشاها، آنزیم‌ها و رنگیزه‌های فتوسنتزی اشاره کرد (Dien et al., 2019). افزایش در محتوای پرولین در گیاهان تیمار شده با سلنیوم احتمالاً به دلیل تأثیر آن بر یکی از آنزیم‌های متابولیسم پرولین به نام آنزیم γ -GK¹ می‌باشد (Abbas, 2012). کاهش میزان قندهای محلول تحت تأثیر تنش خشکی در برخی منابع اشاره شده است. در این راستا گزارش شده است که محدودیت آبی موجب کاهش میزان قندهای محلول در ارقام مختلف برنج گردید (Dien et al., 2019) که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد. گزارش گردیده است که استفاده از نانوسلنیوم ممکن است متابولیسم کربوهیدرات را افزایش دهد (Borbely et al., 2021).

محتوای نسبی آب و هدایت الکتریکی

حداکثر محتوای نسبی آب متعلق به محلول پاشی ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم (به ترتیب ۸۰/۳ و ۷۹/۴ درصد) می‌باشد. تیمار عدم محلول پاشی نانوسلنیوم از حداکثر

محتوای کلروفیل و کاروتنوئید

محتوای کلروفیل تحت شرایط آبیاری تکمیلی نسبت به شرایط تنش آبی ۷/۳ درصد بهبود یافت (شکل ۱). محلول پاشی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در مقایسه با عدم محلول پاشی محتوای کلروفیل را به ترتیب ۳۲/۲، ۸۴/۱ و ۷۸/۹ درصد بهبود بخشید (جدول ۲). در شرایط محدودیت آبی محلول پاشی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم میزان کاروتنوئید را در مقایسه با عدم مصرف نانوسلنیوم به ترتیب ۲۰/۷، ۲۱/۶ و ۵۱/۹ درصد افزایش داد (جدول ۳).



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر اصلی آبیاری بر محتوای کلروفیل کل جو

Fig. 1. Mean comparison of the effect of irrigation on total chlorophyll content of barley

از دلایل اصلی کاهش میزان کلروفیل می‌توان به افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز و تغییر در مسیر متابولیسم نیتروژن در راستای سنتز ترکیباتی از قبیل پرولین، صدمه اکسیداتیو لپیدهای کلروپلاست و تخریب نوری کمپلکس پروتئینی رنگدانه‌ها و آسیب به رنگیزه‌های فتوسنتزی در اثر تنش اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی (Seyed Sharifi et al., 2020) اشاره کرد. افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی در اثر تیمار سلنیوم در چندین محصول گزارش شده است (Borbely et al., 2021; Niu et al., 2023). غلظت متوسط سلنیوم (۲۰ میلی‌گرم در لیتر) بیش‌ترین افزایش را در محتوای کلروفیل و کاروتنوئید سبب گردید که نشان‌دهنده اثر محافظت نوری سلنیوم بر روی کمپلکس فتوسنتزی است (Niu et al., 2023). افزایش غلظت کلروفیل ممکن است به اثر محافظتی نانوسلنیوم بر روی آنزیم‌های خاص کلروپلاست

¹ The enzyme γ -glucokinase

تنش خشکی با افزایش لیگنیفیکاسیون آوندی موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ در گندم می‌شود (Seyed Sharifi et al., 2020). در این پژوهش کاربرد سلنیوم محتوای کلروفیل (جدول ۲) و کاروتنوئید (جدول ۳) را بهبود بخشید. سلنیوم در گیاهان به عنوان آنتی‌اکسیدان در برابر تنش‌های غیرزنده عمل می‌کند و از این طریق می‌تواند سبب پایداری غشاهای سلولی گردد (Zahedi et al., 2019). گزارش شده‌است سلنیوم می‌تواند تنش اکسیداتیو برگ گندم و پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش و موجب بهبود پایداری غشای سلولی تحت شرایط تنش گردد (Wu et al., 2024).

محتوای نسبی آب (۶۸/۶۶ درصد) برخوردار بود که با تیمار محلول پاشی ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تفاوت معنی‌داری را از لحاظ آماری دارا نبود (جدول ۲). بالاترین میزان هدایت الکتریکی در کاربرد ۱۰ میلی‌گرم در لیتر (۷۶/۷ میکروزیمنس بر متر) و بدون کاربرد نانوسلنیوم (۷۵/۷۶ میکروزیمنس بر متر) به دست آمد. کم‌ترین میزان هدایت الکتریکی نیز متعلق به تیمارهای کاربرد ۲۰ (۷۰/۴) و ۳۰ (۷۰/۸۸) میکروزیمنس بر متر) میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود (جدول ۲).

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر نانوسلنیوم بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی جو

Table 2. Mean comparison the effect of nano-selenium on some morphological and physiological traits of barley

نانوسلنیوم nano-selenium	کلروفیل کل Total chlorophyll	هدایت Electrical conductivity	محتوای نسبی آب Relative water content	ارتفاع بوته Plant height	تعداد سنبله در بوته Spikes per plant	طول سنبله Spike length
mg L ⁻¹	mg g ⁻¹ FW	μs m ⁻¹	%	cm		cm
0	8.41 ^c	75.76 ^a	68.66 ^b	101.16 ^c	2.0 ^b	4.13 ^b
10	11.12 ^b	76.7 ^a	75.7 ^{ab}	103.66 ^b	2.33 ^b	4.28 ^b
20	15.49 ^a	70.4 ^b	80.3 ^a	105.33 ^a	4.33 ^a	5.38 ^a
30	15.05 ^a	70.88 ^b	79.4 ^a	104.83 ^a	4.33 ^a	5.5 ^a

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with similar letters in each column show non-significant difference. FW: fresh weight

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل آبیاری و نانوسلنیوم بر برخی صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی جو

Table 3. Mean comparison of the effects of irrigation × nano-selenium on some morphological and physiological traits of barley

		کاروتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	قندهای	تعداد دانه	وزن صد	عملکرد	پروتئین
				محلول Soluble sugars	در سنبله Grain per spike	دانه 100- grain weight	دانه Grain yield	دانه Grain protein
		-----mg.g ⁻¹ FW-----				g	kg ha ⁻¹	%
بدون آبیاری NO Irrigation	0	2.31 ^e	8.81 ^c	22.46 ^f	15.33 ^d	3.53 ^d	1749.58 ^e	13.14 ^a
	10	2.79 ^c	8.83 ^c	25.3 ^e	21.33 ^c	3.86 ^c	2661.33 ^c	13.26 ^a
	20	2.81 ^c	9.15 ^b	26.36 ^e	22.33 ^{bc}	3.66 ^{cd}	2647.17 ^{cd}	13.75 ^a
	30	3.51 ^b	9.66 ^a	28.53 ^d	24.0 ^{ab}	4.26 ^b	3004.17 ^b	13.65 ^a
آبیاری تکمیلی Supplementary irrigation	0	2.54 ^d	7.51 ^e	75.47 ^c	21.33 ^c	3.90 ^c	2461.83 ^d	9.65 ^b
	10	2.89 ^c	7.63 ^e	76.46 ^c	21.33 ^c	4.26 ^b	2865.75 ^b	9.92 ^b
	20	3.87 ^a	8.75 ^c	86.77 ^a	22.66 ^{bc}	4.80 ^a	3312.75 ^a	9.87 ^b
	30	2.57 ^d	8.11 ^d	84.55 ^b	25.33 ^a	4.73 ^a	3357.58 ^a	10.23 ^b

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

Means with similar letters in each column show non-significant difference. FW: fresh weight.

۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر (۴۴/۳ عدد) و نیز حداکثر طول سنبله با کاربرد ۳۰ و ۲۰ (به ترتیب ۵/۵ و ۵/۳۸ سانتی‌متر) میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد (جدول ۲). کم‌ترین ارتفاع بوته (۱۰۱/۱۶ سانتی‌متر)، تعداد سنبله در بوته (۲)

ارتفاع بوته، تعداد سنبله در بوته، تعداد دانه در سنبله و طول سنبله

بیش‌ترین ارتفاع بوته با کاربرد ۲۰ (۱۰۵/۳۳ سانتی‌متر) و ۳۰ (۱۰۴/۸۳ سانتی‌متر)، بیش‌ترین تعداد سنبله در بوته با کاربرد

فتوسنتز، تخریب غشایی، عدم تطابق جذب آب و مواد مغذی و انتقال آن‌ها و کافی نبودن جابجایی آسیمیلات‌های دانه و تلاش گیاه برای جذب آب از محیط ریشه نسبت داد (Seyed Sharifi et al., 2020). استفاده از سلنیوم هم-چنین باعث افزایش عملکرد در گندم (Lanza and Reis, 2024; Wu et al., 2021)، برنج (Huang et al., 2024) گردید. این افزایش عملکرد را می‌توان به نقش سلنیوم در تولید اسید آسکوربیک و گلوکاتیون نسبت داد که نقش اکسیداسیون- احیا برای محافظت از گیاه در برابر تنش‌های محیطی را دارا هستند (Lanza et al., 2021). بهبود عملکرد گیاهان در اثر محلول‌پاشی نانو سلنیوم به عواملی مانند شرایط محیطی و غلظت سلنیوم بستگی دارد (Zhou et al., 2020). نانو سلنیوم می‌تواند تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان تحریک کند (Ma et al., 2024) و مقاومت آن‌ها را در برابر تنش‌های غیرزیستی افزایش دهد و به طور بالقوه از کاهش عملکرد گیاه جلوگیری کند (Zhou et al., 2020).

پروتئین دانه

بالاترین محتوای پروتئین دانه (۱۳/۷۵ درصد) از کاربرد ۲۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم تحت شرایط بدون آبیاری حاصل شد (جدول ۳). محتوای پروتئین دانه با مصرف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم در مقایسه با شاهد تحت شرایط بدون آبیاری به ترتیب ۰/۹، ۴/۶ و ۳/۸ درصد و تحت شرایط آبیاری تکمیلی نیز به ترتیب ۲/۷، ۲/۲ و ۶ درصد افزایش یافت (جدول ۳).

در شرایط خشکی جذب و تثبیت CO₂ بر اثر بسته شدن نسبی روزنه‌ها و یا کاهش درجه گشودگی آن‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین میزان کل مواد پرورده برای پر شدن دانه کاهش می‌یابد، ولی تنش خشکی انتقال مجدد نیتروژن از برگ‌ها به دانه را کاهش نمی‌دهد و این امر سبب افزایش پروتئین دانه می‌شود (El-Kholy et al., 2005). هم‌چنین بالا بودن محتوای پروتئین در گندم تحت تنش، احتمالاً به دلیل کاهش عملکرد و افزایش نسبی غلظت نیتروژن در دانه ناشی از این کاهش است (Babaei et al., 2017). اگرچه هیچ تفاوت معنی‌داری در میزان درصد پروتئین دانه بین غلظت‌های نانو سلنیوم مشاهده نشد، با این حال سطوح بالای نانو سلنیوم (۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر) در مقایسه با ۱۰ میلی‌گرم تأثیر بیش‌تری در بهبود پروتئین دانه داشتند.

عدد) و طول سنبله (۴/۱۳ سانتی‌متر) در حالت بدون استفاده از نانو سلنیوم (شاهد) مشاهده گردید (جدول ۲). بیش‌ترین تعداد دانه در سنبله از ترکیب تیماری ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم در شرایط آبیاری تکمیلی (۲۵/۳۳ عدد) حاصل گردید که با کاربرد ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم تحت شرایط بدون آبیاری از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را نداشت (جدول ۳). تنش خشکی از طریق کاهش تورژسانس سلولی، کاهش توسعه سلولی، تقسیم سلولی و دی‌هیدراسیون پروتوپلاسم سبب کاهش ارتفاع بوته گندم می‌گردد (El-Kholy and Gaballah, 2005). پژوهش‌ها کاهش تعداد دانه در سنبله در شرایط تنش خشکی در ارقام مختلف گندم را نشان داده است (Duggan and Fowler, 2006). گزارش گردیده است که محلول‌پاشی ۲۰ میلی‌گرم نانو سلنیوم به طور قابل توجهی موجب افزایش تقسیم سلولی، افزایش رشد ریشه و کاهش اثرات تنش در گیاهان و در نتیجه بهبود رشد و نمو گیاه می‌گردد (Zhu et al., 2022). هم‌چنین گزارش شده که رشد گیاه ناشی از سلنیوم به دلیل افزایش تجمع نشاسته در کلروپلاست‌ها می‌باشد (Turakainen et al., 2004).

وزن صد دانه و عملکرد دانه

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که وزن صد دانه و عملکرد دانه تحت تأثیر آبیاری تکمیلی و محلول‌پاشی نانو سلنیوم افزایش یافت. بیش‌ترین عملکرد دانه (۳۳۵۷/۵۸ کیلوگرم در هکتار) از ترکیب تیماری مصرف ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم تحت شرایط آبیاری تکمیلی به دست آمد که با ترکیبات تیماری مصرف ۲۰ میلی‌گرم در آبیاری تکمیلی از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. کم‌ترین عملکرد دانه (۱۷۴۹/۸۵۸ کیلوگرم در هکتار) نیز از عدم مصرف نانو سلنیوم تحت شرایط بدون آبیاری حاصل شد. هم‌چنین حداکثر وزن صد دانه گندم در تیمار استفاده از ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم (به ترتیب ۴/۸ و ۴/۷۳ گرم) و حداقل این شاخص (۳/۵۳ گرم) در حالت بدون کاربرد نانو سلنیوم به دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان داد که تحت شرایط بدون آبیاری استفاده از ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سلنیوم در مقایسه با شاهد عملکرد دانه را به ترتیب ۵۲/۱، ۵۱/۳ و ۷۱/۷ درصد و وزن صد دانه را به ترتیب ۹/۳، ۳/۶ و ۲۰/۶ درصد افزایش داد (جدول ۳).

دلیل کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی را می‌توان به عواملی چون کاهش تقسیم سلولی و رشد، کاهش

محلول پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم و بالاترین میزان پروتئین از کاربرد ۳۰ میلی گرم در لیتر به دست آمد. از طرفی بیشترین عملکرد و تعداد دانه در سنبله هم در شرایط آبیاری تکمیلی و هم در شرایط بدون آبیاری در کاربرد ۳۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده گردید. هم‌چنین محلول پاشی ۲۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم بیشترین تأثیر را در بهبود محتوای کلروفیل، محتوای نسبی آب، ارتفاع بوته و نیز بالاترین تأثیر را در کاهش هدایت الکتریکی داشت. نتایج این مطالعه نشان داد که محلول پاشی نانوسلنیوم یک استراتژی مفید برای بهبود تحمل گیاهان به تنش خشکی و متعاقباً افزایش عملکرد است.

نتیجه‌گیری نهایی

بررسی عملکرد، صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی نشان داد که تنش خشکی میزان پرولین برگ و پروتئین دانه را افزایش و محتوای کلروفیل، کاروتنوئید، قندهای محلول، عملکرد و صفات مورفولوژیک را کاهش داد. تحت شرایط تنش خشکی کاربرد ۳۰ میلی گرم در لیتر نانوسلنیوم بیشترین میزان کاروتنوئید، پرولین، قندهای محلول و وزن صددانه و مصرف ۲۰ میلی گرم در لیتر نیز بیشترین محتوای پروتئین دانه را دارا بود. در صورتی که بالاترین مقدار کاروتنوئید، پرولین، قندهای محلول و وزن صددانه در شرایط آبیاری تکمیلی از

منابع

- Abbas, S.M., 2012. Effects of low temperature and selenium application on growth and the physiological changes in sorghum seedlings. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 8, 268-286.
- Akash, M.W., Al-abdallat, A.M., Saoub, H.M., Ayad, J.Y., 2009. Molecular and field comparison of selected barley cultivars for drought tolerance. *Journal of New Seeds*. 10, 98-111.
<https://doi.org/10.1080/15228860902901710>
- Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24, 1-15.
<https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Auobi Amirabad, S., Behtash, F., Vafae, Y., 2020. Selenium mitigates cadmium toxicity by preventing oxidative stress and enhancing photosynthesis and micronutrient availability on radish (*Raphanus sativus* L.) cv. Cherry Belle. *Environmental Science and Pollution Research*. 27, 12476-12490.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-07751-2>
- Azmat, A., Yasmin, H., Hassan, M.N., Nosheen, A., Naz, R., Sajjad, M., Ilyas, N., Akhtar, M.N., 2020. Co-application of bio-fertilizer and salicylic acid improves growth, photosynthetic pigments and stress tolerance in wheat under drought stress. *PeerJ*. 8, e9960.
<https://doi.org/10.7717/peerj.9960>
- Babaei, K., Seyed Sharifi, R., Pirzad, A., Khalilzadeh, R., 2017. Effects of bio fertilizer and nano Zn-Fe oxide on physiological traits, antioxidant enzymes activity and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress. *Journal of Plant Interactions*. 12, 381-389.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1371798>
- Badawy, E.M., Hanafy, A.H., Eman, E., Ahmed, S.S., Laura, P., Fouad, H., 2017. Effect of salinity, selenium and boron on chemical composition of *Brassica napus* L. plants grown under sandy soil conditions. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 8, 2645-2655.
- Bates, L.S., Waldren, R.A., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39, 205-207.
<https://doi.org/10.1007/bf00018060>
- Borbely, P., Molnar, A., Valyon, E., Ordog, A., Horvath-Boros, K., Csupor, D., 2021. The effect of foliar selenium (Se) treatment on growth, photosynthesis, and oxidative-nitrosative signalling of *Stevia rebaudiana* leaves. *Antioxidants*. 10, 72.
<https://doi.org/10.3390/antiox10010072>
- Chelah, M.C., Nordin, M.N.B., Isa, M.B.M., Khanif, Y.M., Jahan, M.S., 2011. Composting increases BRIS soil health and sustains rice production. *Science Asia*. 37, 291-295.
<https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2011.37.291>
- Chen, S., Jiang, T.C., Ma, H.J., He, C., Xu, F., Robert, W.M., Feng, H., Yu, Q., Siddique, K. H.M., Dong, Q.G., He, J.Q., 2020. Dynamic within-season irrigation scheduling for maize production in Northwest China: a method based on weather data fusion and yield prediction by

- DSSAT. Agricultural and Forest Meteorology. 285–286, 107928. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107928>
- Dien, D.C., Mochizuki, T., Yamakawa, T., 2019. Effect of various drought stresses and subsequent recovery on proline, total soluble sugar and starch metabolisms in Rice (*Oryza sativa* L.) varieties. Plant Production Science. 22, 530-545. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1647787>
- Dubios, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Roberts, P.A., Smith, F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Annals of Chemistry. 28, 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Duggan, B.L., Fowler, D.B., 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. Crop Science. 46, 1479-1487. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0126>
- El-Kholy, M.A., Gaballah, M.S., 2005. Productivity of wheat cultivars as affected by seeding methods and reflectant application under water stress condition. Journal of Agronomy. 4, 23-30. <https://doi.org/10.3923/ja.2005.23.30>
- Habibi, Gh. 2013. Effect of drought stress and selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barley. Acta Agriculturae Slovenica. 101, 31-39
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Raza, A., Hawrylak-Nowak, B., MatraszekGawron, R., Mahmud, J.A., Nahar, K., Fujita, M., 2020. Selenium in plants: boon or bane? Environmental and Experimental Botany. 178, 104170. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104170>
- Huang, S., Qin, H., Jiang, D., Lu, J., Zhu, Z., Huang, X., 2024. Bio-nano selenium fertilizer improves the yield, quality, and organic selenium content in rice. Journal of Food Composition and Analysis. 132, 106348. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106348>
- Lanza, M.G.D.B., Reis, A.R.D., 2021. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses. Plant Physiology and Biochemistry. 164, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.026>
- Ma, F., Yang, L., Zhao, T., Yuan, Y., Zheng, S., 2024. Foliar application of microbial nano-selenium enhances selenium uptake and alleviates oxidative stress. The Microbe. 4, 100147. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100147>
- Niu, H., Zhan, K., Cheng, X., Deng, Y., Hou, C., Zhao, M., Peng, C., Chen, G., Hou, R., Li, D., Wan, X., Cai, H., 2023. Selenium foliar application contributes to decrease ratio of water-soluble fluoride and improve physio-biochemical components in tea leaves. Ecotoxicology and Environmental Safety. 266, 115568. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115568>
- Sairam, R.K., Srivastava, G.C., 2001. Water stress tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) variations in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science. 186, 63-70.
- Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., Pirzad, A., Anwar, S., 2020. Effects of biofertilizers and nano zinc-iron oxide on yield and physicochemical properties of wheat under water deficit conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 51, 2511-2524. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1845350>
- Turakainen, M., Hartikainen, H., Seppänen, M.M., 2004. Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentrations of soluble sugars and starch. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 52, 5378-5382. <https://doi.org/10.1021/jf040077x>
- Wu, T., Zhou, J., Zhou, J., 2024. Comparison of soil addition, foliar spraying, seed soaking, and seed dressing of selenium and silicon nanoparticles effects on cadmium reduction in wheat (*Triticum turgidum* L.). Chemosphere. 362, 142681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142681>
- Zahedi, S.M., Sadat Hosseini, M., Daneshvar Hakimi Meybodi, N., da Silva, J.A.T., 2019. Foliar application of selenium and nano-selenium affects pomegranate (*Punica granatum* cv. Malase Saveh) fruit yield and quality. South African Journal of Botany. 124, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.05.019>

- Zhang, Y., Qiang, S., Zhang, G., Sun, Min., Wen, X., Liao Y., Gao Z., 2023. Effects of ridge–furrow supplementary irrigation on water use efficiency and grain yield of winter wheat in Loess Plateau of China. *Agriculture Water Managements.* 289, 108537. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108537>
- Zhou, X., Yang, J., Kronzucker, H.J., Shi, W., 2020. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review. *Frontiers in Plant Science.* 11, 586421. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.586421>
- Zhu, Y., Dong, Y., Zhu, N., Jin, H., 2022. Foliar application of biosynthetic nano-selenium alleviates the toxicity of Cd, Pb, and Hg in *Brassica chinensis* by inhibiting heavy metal adsorption and improving antioxidant system in plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 240, 113681. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113681>