نشریه علمی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی، جلد پانزدهم، شماره ۳(۵۹)، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۳۱۶-۲۹۹

مقاله پژوهشی DOI: 10.30495/jcep.2021.687014

بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و زراعی کلزای پاییزه (*Brassica napus* L.) با کاربرد نانوسلنیوم

غلام بهزاد[1]، پریسا شیخ‌زاده[2]*، ناصر زارع[2] و میترا رستمی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۸

چکیده

بررسی اثر کاربرد نانوسلنیوم بر خصوصیات زراعی و عملکردی کلزای پاییزه، با محلول‌پاشی نانوسلنیوم در سه سطح (عدم محلول‌پاشی (صفر)، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) در دو مرحله ۸-۶ برگی و مرحله پنجاه درصد گلدهی طی سال زراعی ۹۸-۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. نتایج نشان داد که با کاربرد نانوسلنیوم میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای نسبی آب برگ‌ها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. محلول‌پاشی بوته‌های کلزای پاییزه با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل a، b و کلروفیل کل به‌ترتیب به مقدار ۳۷/۰۴، ۴۴/۵۱ و ۳۹/۶۸ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی گردید. نانوسلنیوم از طریق افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی و افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها موجب افزایش معنی‌دار ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی و قطر ساقه کلزا شد. عملکرد کل، شاخص برداشت و عملکرد روغن دانه‌های حاصل از بوته‌های محلول‌پاشی شده با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود. محلول‌پاشی بوته‌های کلزا در طی دو مرحله رویشی و پنجاه درصد گلدهی از طریق افزایش معنی‌دار تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه موجب افزایش عملکرد دانه در واحد سطح گردید. چنانکه، بیشترین افزایش عملکرد دانه در واحد سطح (۳۴/۱۶ درصدی) در مقایسه با شاهد در تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد. به‌طورکلی، کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تاثیر مثبت و معنی‌داری بر صفات فیزیولوژیکی و زراعی (رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای نسبی آب برگ‌ها، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، قطر ساقه، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه) کلزای پاییزه داشت و این امر در نهایت موجب افزایش عملکرد اقتصادی گردید.

واژگان کلیدی: دانه‌های روغنی، عملکرد دانه، کلروفیل، نانوسلنیوم.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانشیار گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳- مربی دانشگاه جامع علمی-کاربردی، اردبیل، ایران.

* نگارنده‌ی مسئول sheikhzadehmp@gmail.com

مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان دانه روغنی است که دانه‌های آن حاوی ۴۸-۴۰ درصد روغن و کنجاله آن حاوی ۴۰-۳۵ درصد پروتئین می‌باشد. کنجاله کلزا نیز به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین منابع در تغذیه دام و طیور می‌باشد. همچنین، کنجاله این گیاه پتانسیل تبدیل شدن به سوخت زیستی را نیز دارد (Molazem *et al*., 2013; Anonymous, 2019). روغن دانه‌ی کلزا به‌دلیل ترکیب مناسب اسیدهای چرب غیراشباع اسید اولئیک (امگا ۹)، اسید لینولئیک (امگا ۶)، اسید آلفالینولنیک (امگا ۳) و داشتن پایین‌ترین میزان اسیدهای چرب اشباع (کمتر از ۷٪) با کیفیت‌ترین روغن خوراکی است (Molazem *et al*., 2013; Kraljic´ *et al*., 2013). کشت این گیاه در ایران به‌دلیل تولید روغن خوراکی و کنجاله‌ای با کیفیت بالا برای خوراک دام، مورد توجه قرار گرفته است (Rameeh, 2012). بنابراین، افزایش کیفیت و کمیت تولید و عملکرد این محصول در کشور ضروری به‌نظر می‌رسد.

سلنیوم (Se) یکی از عناصر ریزمغذی بوده و میزان این عنصر در خاک‌های ایران در حدود ۰/۰۴ ppm تا ۰/۴۵ با میانگین غلظت در حدود ۰/۲۳ ppm گزارش شده که نسبت به میانگین جهانی (۰/۴ ppm) نسبتاً پایین است. میزان سلنیوم در خاک استان اردبیل حدود ۰/۲۱ ppm گزارش شده است که در مقایسه با میانگین غلظت این عنصر در خاک‌های ایران پایین است (Nazemi *et al*., 2012). سلنیوم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و پراکسیداز و کاهش فعالیت رادیکال‌های آزاد در گیاه می‌شود، این عمل به‌نوبه خود موجب افزایش پایداری غشای سلولی و بهبود پتانسیل آبی گیاه و در نهایت افزایش عملکرد دانه می‌گردد (Haghighi and Teixeira da Silva, 2016; Dadnia, 2018; Elemike, *et al*., 2019).

مطالعات نشان داده است که افزایش عملکرد دانه در اثر کاربرد سلنیوم، به‌دلیل تاثیر مثبت این عنصر بر جلوگیری از روند تخریب کلروفیل a و b، افزایش روند ساخت پرولین و افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌باشد. سلنیوم از طریق افزایش جذب آب به‌دلیل توسعه‌ی ریشه‌ها موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها و کاهش روند تخریب رنگیزه‌های فتوسنتزی (Seppänen *et al*., 2003) و تاخیر در پیری برگ‌ها شده و از طریق افزایش تثبیت کربن موجب افزایش فرایند فتوسنتزی می‌گردد. این امر در نهایت به بهبود رشد و نمو و افزایش عملکرد و اجزای عملکرد منجر می‌شود (Bybordi, 2016). اثرات مفید کاربرد برگی سلنیوم روی رشد گیاه نخود (Shedeed *et al*., 2018)، عدس (Ekanayake *et al*., 2015)، توتون (Jiang *et al*., 2015) و سویا (Djanaguiraman *et al*., 2005) گزارش شده است.

یکی از مهم‌ترین کاربرد نانوذرات در بخش کشاورزی، تولید کودها در ابعاد نانو است که به دلیل کمک به بهبود تغذیه و افزایش عملکرد گیاهان مورد توجه قرار گرفته است (Mohamadipoor *et al*., 2013). استفاده از نانوکودها به‌صورت محلول‌پاشی موجب جذب سریع‌تر عنصر شده و افزایش کارایی مصرف کودها و کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از آنها می‌گردد (Aytac *et al*., 2014). از آن‌جایی که تحرک سلنیوم در خاک کم است و مواد نانو دارای حلالیت بالا و سطح واکنش بیشتری نسبت به فرم معدنی عناصر می‌باشند، بنابراین کاربرد

سلنیوم به‌صورت نانوذره می‌تواند مؤثرتر باشد. زیرا این عنصر به فرم نانوذره خاصیت آنتی‌اکسیدانی بسیار بیشتر و بهتری نسبت فرم معدنی از خود نشان می‌دهد (Elemike *et al.*, 2019). بنابراین، غنی‌سازی محصولات زراعی با استفاده از نانوسلنیوم یک استراتژی مناسب برای افزایش عملکرد در گیاهان است (Haghighi and Teixeira da Silva, 2016). در تعدادی از مطالعات بر تاثیر مثبت سلنیوم به‌شکل نانوذره بر رشد برخی گیاهان از جمله گوجه‌فرنگی (Schiavon *et al.*, 2013)، بادام‌زمینی (Prasad *et. al.*, 2012)، ریحان (Peyvandi *et al.*, 2011)، خیار (Haghighi and Teixeira da Silva, 2016) و پیاز (Amerian *et al.*, 2015) گزارش شده است.

هدف از این مطالعه، بررسی اثرات کاربرد نانوسلنیوم بر خصوصیات فیزیولوژیکی، زراعی و عملکردی کلزای پاییزه بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه محقق اردبیلی واقع در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال شرق شهر اردبیل در منطقه بابلان (با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه عرض جغرافیایی و به ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا) با شرایط آب و هوایی نیمه خشک سرد (براساس آمبرژه) در سال زراعی ۹۸-۹۷ اجرا شد. وضعیت خاک مزرعه آزمایشی از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در جدول ۱ ارایه شده است.

بذر مورد استفاده کلزا در این آزمایش رقم هیبرید گارو بود که از مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان اردبیل (به‌دلیل مرسوم بودن کشت آن در شهرستان) تهیه شد. در اواسط شهریور ماه بعد از برداشت محصول سال قبل، اقدام به آماده‌سازی زمین گردید. برای این منظور عملیات شخم، دیسک‌زنی صورت گرفت. هر کرت آزمایشی شامل شش خط کاشت به طول ۵ متر بود. کاشت بذرهای کلزا در عمق ۲ سانتی‌متری خاک با تراکم ۱۰۰ بذر در مترمربع به‌صورت ردیفی انجام گرفت و بعد از استقرار کامل گیاهچه‌ها بوته‌های اضافی تنک شده و تراکم به ۷۰ بوته در مترمربع رسانده شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بذور روی ردیف ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بلافاصله بعد از کاشت آبیاری کرت‌ها انجام شد و در مراحل بعدی بسته به شرایط آب و هوایی و نیاز گیاه، عملیات آبیاری به‌صورت نشتی در جوی‌های ایجاد شده بین ردیف‌های کاشت انجام گرفت. در طول دوره رشدی در چندین مرحله وجین علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد.

این آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل محلول‌پاشی در سه سطح (عدم محلول‌پاشی (شاهد)، غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم) بودند. نانوسلنیوم مورد استفاده در این تحقیق از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه شده بود. تیمار نانوسلینوم با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت محلول‌پاشی برگی با سمپاش پشتی انجام شد. محلول‌پاشی در دو مرحله شامل: مرحله ۶-۸ برگی (در فصل پاییز) و مرحله پنجاه درصد گلدهی (اواسط فصل بهار) برای همه تیمارها انجام شد. برای افزایش کارآیی محلول‌پاشی و جلوگیری از جمع شدن محلول در یک نقطه و ایجاد برگ سوختگی، از توییین ۲۰ استفاده گردید. محلول‌پاشی با آب‌مقطر جهت اعمال تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم انجام پذیرفت.

برای افزایش راندمان جذب نانوسلنیوم، محلول‌پاشی هنگام صبح زود انجام شد تا رطوبت نسبی هوا بالاتر باشد. یک هفته بعد از اعمال تیمار محلول‌پاشی میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، b و کلروفیل کل و کاروتنوئید برگ‌ها (Arnon, 1949)، محتوای نسبی آب برگ (RWC) (Holaday *et al.*, 1992) و هدایت الکتریکی (EC) (Anonymous, 2017) برای تیمارهای مختلف انجام گرفت. به‌منظور بررسی عملکرد و اجزای عملکرد در انتهای فصل رشد، از هر واحد آزمایشی ۱۰ بوته به‌صورت تصادفی برداشت و ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. برای تعیین عملکرد دانه و عملکرد کل بعد از حذف ردیف‌های انتهایی و نیم‌متر از ابتدا و انتهای هر کرت به‌عنوان حاشیه، به‌اندازه یک مترمربع از هر کرت آزمایشی به‌طور جداگانه کف‌بر و عملکرد دانه و عملکرد کل در واحد سطح تعیین و شاخص برداشت محاسبه شد.

کلیه تجزیه‌های آماری و مقایسه میانگین داده‌های حاصل، پس از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، با نرم‌افزار SAS 9.1 و SPSS انجام گردید. برای مقایسه میانگین داده‌ها از روش دانکن در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد. رسم شکل‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار Excel انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کاروتنوئید: میزان کلروفیل a، b، کلروفیل کل و کارتنوئید به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر سطوح مختلف نانوسلنیوم قرار گرفتند (جدول ۲). با انجام محلول‌پاشی بوته‌های کلزای پاییزه میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی افزایش یافت (شکل ۱)، به‌طوری‌که کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی گردید که این افزایش به‌ترتیب در حدود ۳۷/۰۴، ۴۴/۵۱ و ۱۶/۴۴ درصد بود (شکل ۱). در این صفات، اگرچه بین تیمار عدم مصرف و غلظت ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما کاربرد همین مقدار نانوسلنیوم موجب افزایش ۱۸/۲۹، ۱۲/۳۶ و ۶/۷۳ درصدی میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۱a، ۱b و ۱d). کاربرد برگی نانوسلنیوم در کلزای پاییزه موجب افزایش معنی‌دار میزان کلروفیل کل نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی گردید. با افزایش غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان کلروفیل کل نیز به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش ۳۹/۶۸ درصدی میزان کلروفیل کل نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۱c). قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2016) نیز گزارش کردند که کاربرد سلنیوم موجب افزایش میزان کلروفیل a (۶/۵۴ تا ۳۳/۵۷ درصد)، b (۱۱/۳۹ تا ۳۲/۴۸ درصد) و کلروفیل کل (۸/۱۴ تا ۳۳/۲۱ درصد) برگ‌های کلم بروکلی گردید که این افزایش ناشی از بیوسنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی است. همچنین آنها بیان کردند این افزایش در محتوای کلروفیل برگی، در نتیجه‌ی تاثیر سلنیوم بر افزایش جذب منیزیم و آهن می‌باشد، زیرا سلنیوم موجب جذب بیشتر آهن از خاک شده و در نتیجه موجب رفع کمبود مواد غذایی در گیاه می‌گردد (Mohamadipoor *et al.*, 2013; Ghasemi *et al.*, 2016). افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی با کاربرد سلنیوم در اسفناج (Saffaryazdi *et al.*, 2012)، توتون (Han *et al.*,

2013) و عدس (Ekanayake *et al.*, 2015) نیز گزارش شده است.

محتوای نسبی آب برگ: محتوای نسبی آب برگ به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر سطوح مختلف محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۳). کاربرد غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ در گیاه کلزای پاییزه شد. سلنیوم با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها (Feng *et al.*, 2013; Ajiboso and Adenuga, 2012) و از طریق افزایش جذب آب به‌دلیل توسعه‌ی ریشه‌ها موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود. به‌طوری‌که، بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت (شکل ۲a). کاربرد ۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش محتوای نسبی آب برگ‌های کلزا نسبت به تیمار شاهد گردید. سلنیوم از طریق بهبود تقسیم سلولی در سلول‌های نوک ریشه، باعث افزایش رشد و توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه می‌گردد که همین امر می‌تواند موجب جذب بیشتر آب توسط گیاه تحت تیمار با این عنصر شود. در نهایت افزایش مقدار آب موجود در بافت‌های گیاهی، محتوای نسبی آب برگ را افزایش می‌دهد (Haghani *et al.*, 2020). محتوای نسبی آب برگ‌ها معرف خوبی از وضعیت آب گیاه به‌شمار می‌آید (Davoudi *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد که هر چه میزان آب اندام‌های گیاهی بیشتر باشد، گیاه کمتر در شرایط نامساعد محیطی و تولید رادیکال‌های آزاد قرار می‌گیرد. بنابراین، هر عاملی که بتواند میزان محتوای نسبی آب برگ‌ها را در گیاه افزایش دهد، می‌تواند از طریق حفظ وضعیت آب درون بافت‌ها، خسارت وارده را کاهش یا تعدیل نماید (Talukdar, 2013).

ارتفاع بوته: بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، ارتفاع بوته، به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۳). کمترین ارتفاع بوته کلزا مربوط به بوته‌هایی بود که با نانوسلنیوم تیمار نشده بودند. با کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم ارتفاع بوته کلزا افزایش معنی‌داری یافت. بیشترین ارتفاع بوته مربوط به تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر و آن هم بیشتر از تیمار عدم مصرف نانوسلنیوم بود (شکل ۲b). کاربرد نانوسلنیوم به‌صورت محلول‌پاشی منجر به افزایش ارتفاع بوته در کلزای پاییزه شد (شکل ۲b) که این امر ناشی از افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (شکل ۱) و افزایش محتوای نسبی آب برگ (شکل ۲a) می‌باشد. صفریزدی و همکاران (Saffaryazdi *et al.*, 2012) در گیاه اسفناج گزارش کردند که سلنیوم با تاثیر مثبت بر تثبیت کربن و افزایش میزان نشاسته در کلروپلاست‌ها و تحریک تقسیم سلولی در سلول‌های مریستمی سبب افزایش ارتفاع بوته گردید.

قطر ساقه: تیمار محلول‌پاشی با نانوسلنیوم تاثیر معنی‌داری بر صفت قطر ساقه داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کمترین قطر ساقه در بوته‌های کلزا مربوط به تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم بود (شکل ۲c). با محلول‌پاشی نانوسلنیوم قطر ساقه‌های کلزا به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی افزایش یافت. در بین تیمارهای محلول‌پاشی، با افزایش غلظت

نانوسلنیوم نیز قطر ساقه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این افزایش در تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بیشترین بود (شکل ۲c). کاربرد ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بر روی بوته‌های کلزای پاییزه طی دو مرحله ۸-۶ برگی و ۵۰ درصد گلدهی سبب شد تا قطر ساقه در بوته‌های کلزا به‌ترتیب در حدود ۱۵/۷۹ و ۳۷/۸۹ درصد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی افزایش یابد (شکل ۲c). به نظر می‌رسد اثر مثبت سلنیوم بر قطر ساقه می‌تواند ناشی از افزایش در بزرگ شدن و تقسیمات سلول‌ها باشد که این افزایش موجب افزایش رشد و وزن خشک گیاه می‌گردد (Saffaryazdi *et al.*, 2012). تحقیقات نشان داده است که نانوسلنیوم به‌دلیل حلالیت بیشتر در آب و دارا بودن سطح مخصوص کوچک‌تر بر سطح گیاه رسوب نکرده و با جذب بیشتر و فعال کردن هورمون‌ها باعث افزایش قطر بوته می‌شود (Amerian *et al.*, 2015). تاثیر کاربرد سلنیوم بر افزایش قطر ساقه در گیاه گندم توسط آلدا و همکاران (Alda *et al.*, 2011) نیز گزارش شده که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

تعداد شاخه‌ی فرعی: مطابق نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، تعداد شاخه‌ی فرعی در بوته کلزا به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در بین تیمارهای مورد مطالعه، تیمار عدم محلول‌پاشی کمترین تعداد شاخه فرعی را دارا بود. کاربرد ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم سبب شد تا تعداد شاخه در بوته‌ی کلزا افزایش یابد. بیشترین تعداد شاخه‌ی فرعی مربوط به تیمار محلول‌پاشی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود که اختلاف معنی‌داری با تیمار عدم کاربرد و تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم داشت (شکل ۳a). بین تیمار شاهد و تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. تعداد شاخه فرعی در بوته‌های کلزا با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم در حدود ۵۹/۱۸ درصد افزایش نشان داد (شکل ۳a). به‌نظر می‌رسد افزایش تعداد شاخه فرعی در بوته‌های کلزای مورد مطالعه ناشی از افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (شکل ۱) و افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها (شکل ۲a) باشد. بهبود این ویژگی سبب شده تا رشد رویشی و ارتفاع گیاه (شکل ۲b) افزایش یافته و تعداد شاخه فرعی در کلزا نیز بیشتر شود. صفریزدی و همکاران (Saffaryazdi *et al.*, 2012) گزارش نمودند که سلنیوم با تاثیر مثبت بر سنتز کلروفیل، تثبیت کربن، سنتز و هیدرولیز نشاسته و تحریک تقسیم سلولی در سلول‌های مریستمی سبب افزایش تعداد شاخه در بوته می‌گردد. همچنین، سلنیوم از طریق تنظیم جذب و توزیع برخی عناصر ضروری، تعداد شاخه‌های فرعی گیاه را افزایش می‌دهد (Feng *et al.*, 2013). کاربرد سلنیوم در گیاه گندم، جو و چاودار سبب شد تا تعداد پنجه افزایش یابد (Alda *et al.*, 2011).

تعداد خورجین در بوته: طبق جدول ۳ اثر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم تاثیر معنی‌داری بر تعداد خورجین در بوته داشت. در تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم تعداد خورجین در بوته کلزا به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای کاربرد نانوسلنیوم بود. با کاربرد برگی نانوسلنیوم در طی دو مرحله، تعداد خورجین در بوته‌ی کلزا افزایش معنی‌داری یافت (شکل ۳b). بیشتر شدن غلظت نانوسلنیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، سبب شد تا تعداد خورجین در بوته‌ی کلزا به‌طور

معنی‌داری افزایش یابد. با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تعداد خورجین در بوته کلزا به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم و آن هم بیشتر از تیمار عدم کاربرد گردید (شکل ۳b). محلول‌پاشی با نانوسلنیوم در مرحله روزت و گلدهی موجب شد تا میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ‌های کلزا (شکل ۱) افزایش یابد، در نتیجه سبب بیشتر شدن تعداد شاخه‌های گل‌دهنده از طریق افزایش تعداد شاخه‌ی فرعی (شکل ۳a) گردید. این امر نیز در نهایت بر تعداد خورجین در هر بوته اثر مثبت گذاشت. همچنین، سلنیوم از طریق به‌تأخیر انداختن پیری در گل‌ها، باعث افزایش تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین گردید (Amerian *et al.*, 2015). این نتایج با یافته‌های تالوکدار (Talukdar, 2013) در عدس همخوانی داشت. به‌نظر می‌رسد که با کاربرد سلنیوم رشد گیاه افزایش یافته و از طریق بهبود شرایط گرده‌افشانی باعث افزایش تعداد واحدهای زایشی گردیده است (Kashin and Shubina, 2011).

تعداد دانه در خورجین: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که تعداد دانه در خورجین به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر سطوح محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۳). مطابق شکل ۳c، با انجام محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با نانوسلنیوم، تعداد دانه در خورجین کلزا به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین تعداد دانه در خورجین در تیمار محلول‌پاشی با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم مشاهده گردید که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار عدم محلول‌پاشی بود اما اختلاف معنی‌داری با تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت. نانوسلنیوم با بهبود رشد رویشی و زایشی موجب افزایش تعداد دانه در خورجین گردید (شکل ۳c). این برتری می‌تواند ناشی از افزایش تولید مواد فتوسنتزی در نتیجه افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی (شکل ۱) و در نهایت تولید تعداد خورجین بیشتر در بوته باشد. بایبوردی (Bybordi, 2016) نیز گزارش نمود که افزایش تعداد خورجین در بوته و تعداد دانه در خورجین در اثر مصرف سلنیوم به احتمال زیاد ناشی از افزایش پویایی عناصر و افزایش دسترسی به آب باشد.

وزن هزار دانه: وزن هزار دانه به‌طور معنی‌داری تحت‌تاثیر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۳). همان‌طور که در شکل ۳d مشاهده می‌شود، در بین تیمارهای مورد مطالعه، وزن هزار دانه بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بیشترین بود که اختلاف معنی‌داری با تیمار ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوسلنیوم نداشت. کمترین وزن هزار دانه از تیمار عدم کاربرد نانوسلنیوم به‌دست آمد (شکل ۳d). محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب افزایش ۲۱/۲۲ درصدی و کاربرد ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوسلنیوم سبب افزایش ۱۱/۳۰ درصدی وزن هزار دانه نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی گردید. اما بین تیمار ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوسلنیوم و تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۳d). افزایش وزن هزار دانه در کلزا را می‌توان به اثرات افزایش‌دهنده نانوسلنیوم در رشد رویشی (شکل‌های ۲b و ۲c) و زایشی گیاه نسبت داد، زیرا سلنیوم دارای قابلیت تنظیم وضعیت آب گیاه می‌باشد به این صورت که کاربرد آن موجب افزایش جذب آب و افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها (شکل ۲a) شد که این امر در نهایت سبب افزایش رشد رویشی گیاه از طریق بهبود فرایند

فتوسنتز گردید. در مرحله زایشی نیز، افزایش روند پر شدن دانه‌ها و بیشتر شدن وزن هزار دانه را در پی داشت (شکل ۳d). گزارش شده است با استفاده از سلنیوم، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب در خاک و جذب و انتقال عناصر در گیاه افزایش می‌یابد (Boldrin *et al.*, 2014). افزایش وزن هزاردانه با کاربرد سلنیوم در گندم (Dadnia, 2018) و جو (Nour Ali and Madani, 2017) نیز گزارش شده است.

عملکرد کل: اثر محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با نانوسلنیوم بر عملکرد کل در واحد سطح معنی‌دار بود (جدول ۳). در بین تیمارهای مورد مطالعه بیشترین و کمترین عملکرد کل به‌ترتیب مربوط به تیمار عدم محلول‌پاشی و تیمار کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد. بین غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم از نظر عملکرد کل اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اگرچه افزایش غلظت نانوسلنیوم تاثیر معنی‌داری بر وزن خشک بوته‌های کلزا نداشت. اما انجام محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم، موجب افزایش معنی‌دار وزن‌خشک بوته‌ها به‌ترتیب در حدود ۱۴/۱۴ و ۱۹/۸۰ درصد نسبت به تیمار شاهد گردید (شکل ۴a). نانوسلنیوم توانسته است همراه با افزایش رشد رویشی موجب بیشتر شدن وزن خشک بوته‌های کلزا (عملکرد کل) و تولید دانه‌های درشت‌تر گردد که گویای فتوسنتز بیشتر توسط گیاه از طریق افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌باشد که این نتایج با یافته‌های نواز و همکاران (Nawaz *et al.*, 2015) در گندم و صفریزدی و همکاران (Saffaryazdi *et al.*, 2012) در اسفناج همخوانی دارد. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2018) نیز گزارش کردند که سلنیوم در غلظت مناسب، با کاهش گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن، سبب افزایش میزان انتقال مواد از ریشه به ساقه گیاه و از این طریق سبب بهبود عملکرد بیولوژیک در گیاه برنج گردید.

عملکرد دانه: اثر محلول‌پاشی با نانوسلنیوم تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه در واحد سطح داشت (جدول ۳). میانگین عملکرد دانه در واحد سطح در تیمار بدون کاربرد نانوسلنیوم کمترین بود. با کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم عملکرد دانه در واحد سطح به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین عملکرد دانه با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم حاصل شد که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم بود (شکل ۴b). محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به ترتیب موجب افزایش ۲۸/۱ و ۳۴/۱۶ درصدی عملکرد دانه در واحد سطح نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی گردید. نانوسلنیوم به‌علت افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها (شکل ۲a) موجب افزایش میزان فتوسنتز و افزایش تولید ماده خشک به واسطه کلروفیل‌سازی (شکل ۱) و افزایش تعداد خورجین در بوته (شکل ۳b)، تعداد دانه در خورجین (شکل ۳c) و وزن هزار دانه (شکل ۳d) گردید که افزایش این صفات در نهایت موجب افزایش محصول دانه در واحد سطح شد (شکل ۴b). بهبود وضعیت آب نسبی گیاه و افزایش فتوسنتز را می‌توان دلیل دیگری برای اثر مثبت نانوسلنیوم در افزایش عملکرد و اجزای عملکرد قلمداد کرد. این نتایج با سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه روی عدس (Thavarajah *et al.*, 2015)، جو (Rodrigo *et al.*, 2013)، ذرت (Mohamadipor *et al.*, 2013)، گندم و جو

(Boldirin *et al.*, 2014) و سیر (Wang *et al.*, 2016) مطابقت دارد.

شاخص برداشت: شاخص برداشت، به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر سطوح محلول‌پاشی با نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۳). محلول‌پاشی با غلظت‌های مختلف نانوسلنیوم (۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر) موجب افزایش معنی‌دار شاخص برداشت در گیاه کلزای پاییزه شد. بیشترین میزان شاخص برداشت در بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با بوته‌های محلول‌پاشی شده با ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نداشت (شکل ۴c). افزایش ۱۲ درصدی شاخص برداشت بیانگر این حقیقت است که نانوسلنیوم توانسته است همراه با افزایش رشد رویشی به‌عنوان عملکرد بیولوژیک (شکل ۴a)، سبب افزایش عملکرد دانه (شکل ۴b) شود. این افزایش در شاخص برداشت ناشی از افزایش تولید دانه به‌دلیل افزایش فتوسنتز گیاه می‌باشد. گیاهان محلول‌پاشی شده با نانوسلنیوم هم عملکرد کل و هم شاخص برداشت بیشتری داشتند که موجب افزایش عملکرد دانه‌ی کلزا در واحد سطح گردید. افزایش شاخص برداشت با کاربرد سلنیوم در گیاه کاهو (Feng *et al.*, 2013)، کلم (Hasanuzzaman *et al.*, 2010) و پیاز (Poldma *et al.*, 2013) مطابقت داشت. مدنی (Madani *et al.*, 2012) گزارش کرد که سلنیوم در زمان گلدهی و گرده‌افشانی، عملکرد دانه را به‌علت تعدیل محدودیت مخزن نسبت به افزایش قدرت منبع، افزایش و در نتیجه شاخص برداشت بهبود می‌یابد.

درصد و عملکرد روغن دانه: اثر نانوسلنیوم بر صفت درصد روغن معنی‌دار نبود، اما عملکرد روغن دانه‌ی کلزای پاییزه به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر تیمار نانوسلنیوم قرار گرفت (جدول ۳). اگرچه محلول‌پاشی با نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری درصد روغن دانه‌ی کلزا را تحت تاثیر قرار نداد، اما درصد روغن دانه‌های حاصل از بوته‌های محلول‌پاشی شده با نانوسلنیوم در مقایسه با تیمار عدم کاربرد بیشتر بود (شکل ۵a). عملکرد روغن دانه‌های کلزای حاصل از بوته‌های محلول‌پاشی شده با نانوسلنیوم به‌طور معنی‌داری بیشتر از عملکرد روغن دانه‌های حاصل از بوته‌های شاهد بود (شکل ۵b). کاربرد ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم موجب تولید بیشترین عملکرد روغن دانه گردید که به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار عدم کاربرد بود، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار ۲۵ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم نشان نداد (شکل ۵b). با توجه به این که کاربرد نانوسلنیوم موجب افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی (شکل ۱) در مراحل رشد رویشی و زایشی گردید، این مسئله می‌تواند موجب افزایش عملکرد دانه (شکل ۴b) و در نهایت عملکرد روغن دانه‌ی کلزا (شکل ۵b) گردد. داوودی و همکاران (Davoudi *et al.*, 2018) نیز افزایش عملکرد روغن دانه‌ی کلزا را در اثر کاربرد سلنات سدیم گزارش کردند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسلنیوم تاثیر مثبت و معنی‌داری بر صفات فیزیولوژیکی و زراعی اندازه‌گیری شده در کلزا داشت. کاربرد برگی نانوسلنیوم موجب افزایش تولید ماده خشک و افزایش عملکرد دانه از طریق افزایش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1- Physical and chemical properties of the farm soil

بافت خاک Soil texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	نیتروژن N (ppm)	فسفر P (ppm)	پتاسیم K (ppm)	کربن آلی Organic carbon(%)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (ds/m^{-1})
لومی رسی Clay loam	30.8	53.75	15.5	0.06	11.83	202.5	0.44	7.9	2.68

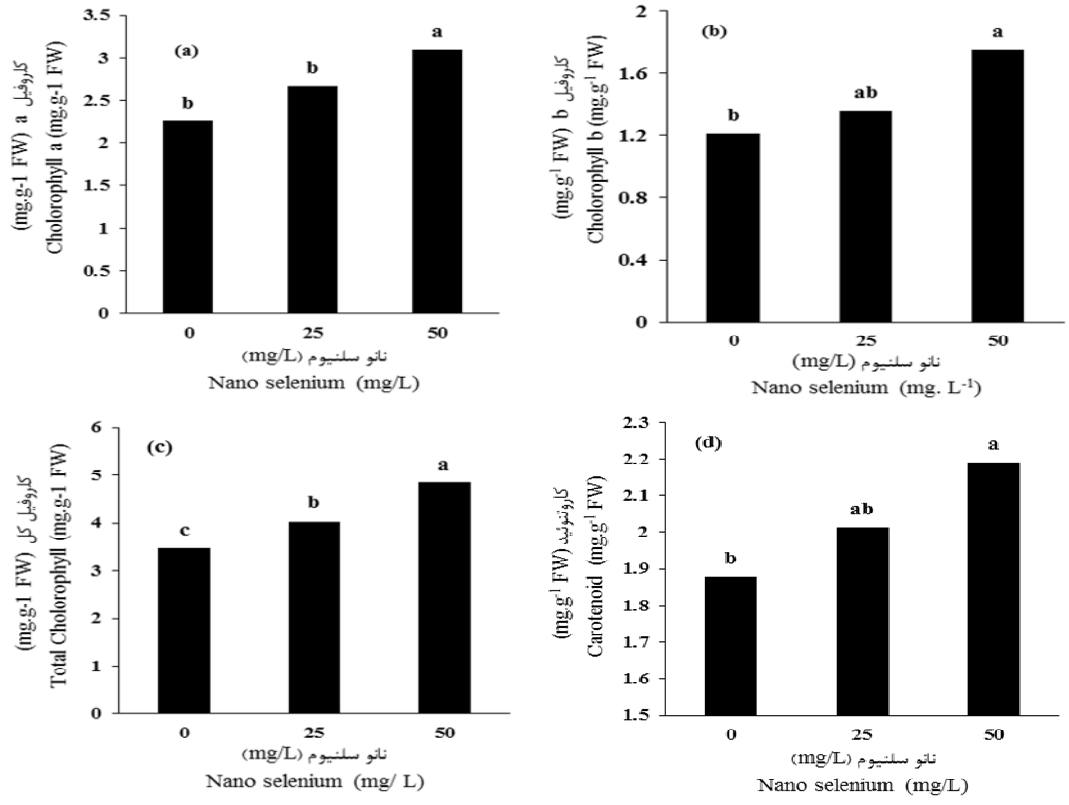
جدول ۲- تجزیه واریانس کلروفیل a، b و کلروفیل کل، و کاروتنوئید برگ‌های کلزای پاییزه تحت‌تاثیر نانوسلنیوم

Table 2- Analysis of variance of the chlorophyll a and b, total chlorophyll and carotenoid of winter oil seed rape leaves affected by of selenium nanoparticles

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid
بلوک (Block)	2	0.289 *	0.054 ns	0.516 **	0.020 ns
نانوسلنیوم (Selenium nanoparticles)	2	0.525 **	0.233 *	1.437 **	0.073 *
خطا (Error)	4	0.017	0.032	0.012	0.008
ضریب تغییرات C.V. (%)		4.85	12.31	2.70	4.36

*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.

*, **, and ns are significant at a probability level of 5%, 1% and non-significant, respectively.



شکل ۱- تاثیر نانوسلنیوم بر میزان کلروفیل a (a)، کلروفیل b (b)، کلروفیل کل (c) و کاروتنوئید (d) برگ کلزای پاییزه

Figure 1- Effect of selenium nanoparticles on chlorophyll a (a), chlorophyll b (b), total chlorophyll (c) and carotenoid (d) content of oilseed rape leaves in field conditions

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر نانوسلنیوم بر صفات فیزیولویکی، زراعی و عملکردی کلزای پاییزه

Table 3- Analysis of variance the effects of selenium nanoparticles on physiological, agronomic and yield characteristic of winter oil seed rape

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares					
		محتوای نسبی آب برگ RWC	ارتفاع بوته Plant height	قطر ساقه Stem diameter	شاخه‌ی فرعی Number of branch	غلاف در بوته Number of pod per plant	دانه در بوته Number of seed per plant
بلوک (Block)	2	3.001 ns	0.618 ns	0.003 ns	1.062 ns	34.157 ns	0.063 ns
نانوسلنیوم (Selenium nanoparticles)	2	12.128 *	71.283 **	1.090 **	15.602 **	1975.231 **	24.243 *
خطا (Error)	4	1.273	1. 173	0.003	1. 132	26.178	2.187
ضریب تغییرات C.V.(%)		1.41	1.00	1.55	11.53	4.00	7.36

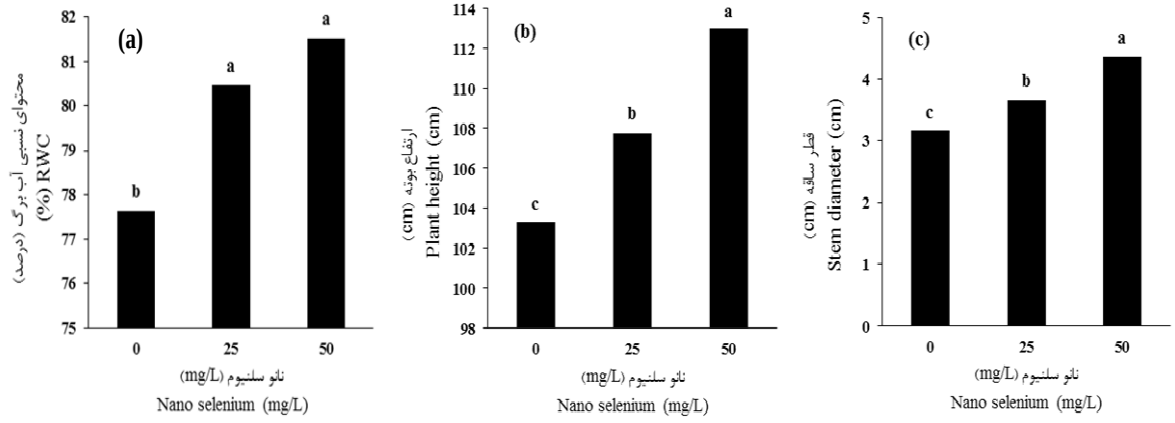
ادامه جدول ۳

Table 3- Continued

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of Squares					
		وزن هزار دانه 1000 grain yield	عملکرد کل در واحد سطح Total yield per unit area	عملکرد دانه در واحد سطح Grain yield per unit area	شاخص برداشت Harvest index	درصد روغن Oil percent	عملکرد روغن Oil yield
بلوک (Block)	2	0.029 ns	1561.87 ns	24.671 ns	2.56 ns	0.956 ns	523.857 ns
نانوسلنیوم (Selenium nanoparticles)	2	0.489 *	17647.097 **	6441.499 **	17.001 *	0.684 ns	126041.6 **
خطا (Error)	4	0.046	381.008	14.474	1.519	1.220	2208.678
ضریب تغییرات C.V. (%)		5.06	2.33	1.24	3.37	2.67	3.70

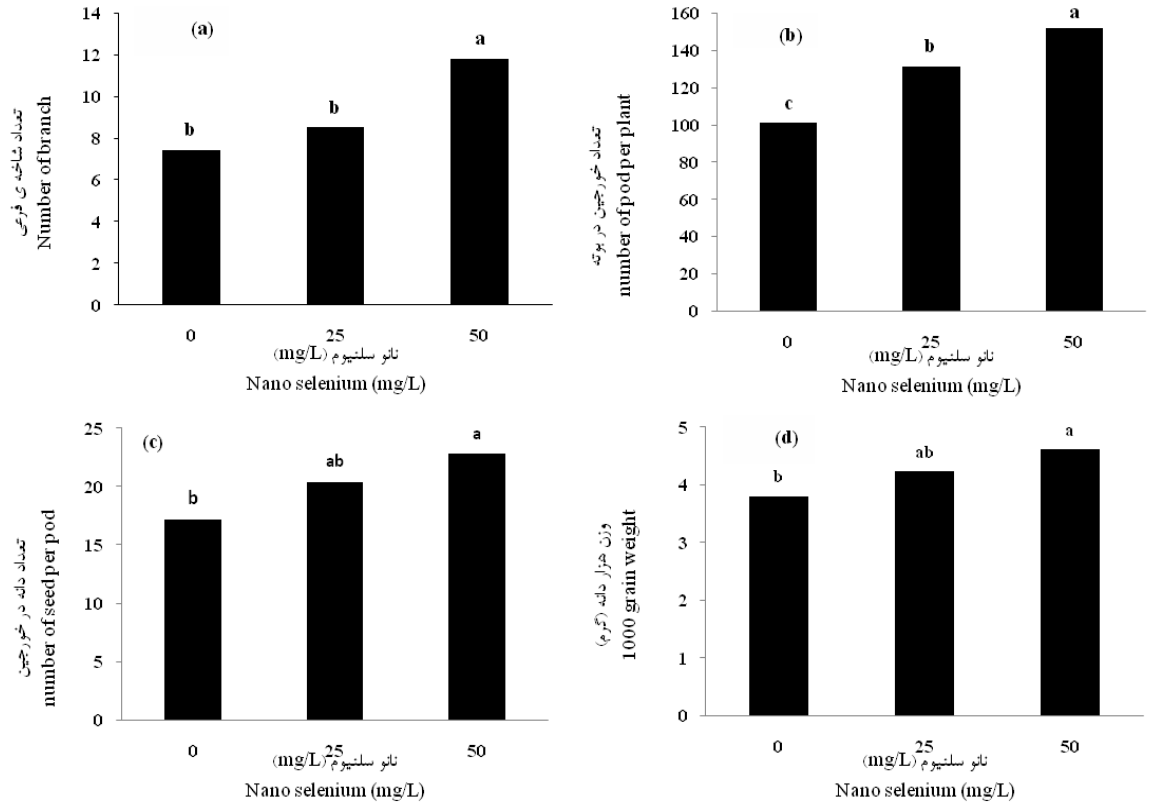
*، ** و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، یک درصد و غیر معنی‌دار می‌باشند.

*, **, and ns are significant at a probability level of 5%, 1% and non-significant, respectively.



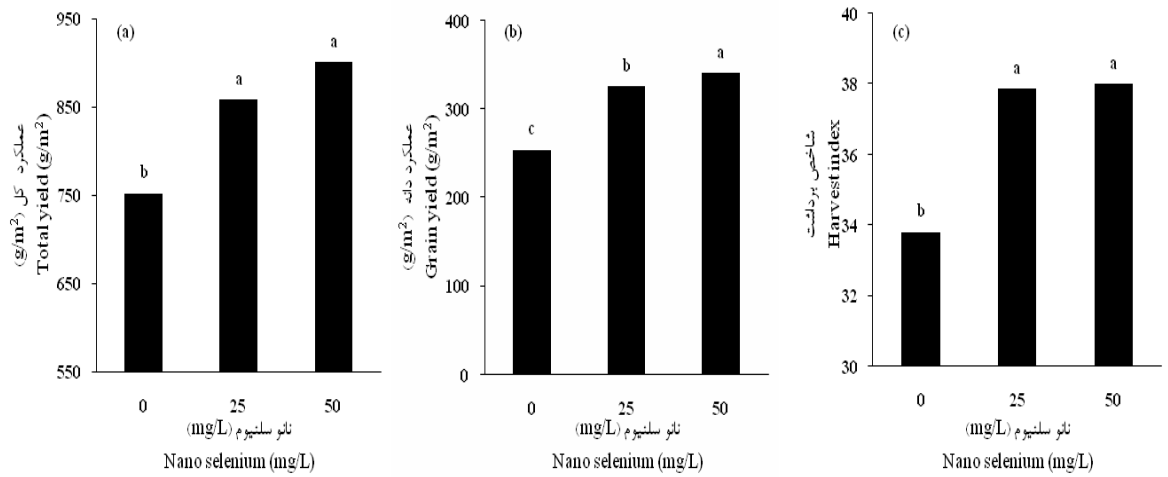
شکل ۲- تاثیر نانوسلنیوم بر محتوی نسبی آب برگ (a)، ارتفاع بوته (b)، قطر ساقه (c) کلزای پاییزه

Figure 2- Effect of selenium nanoparticles on RWC (a), plant height (b) and stem diameter (c) of oilseed rape



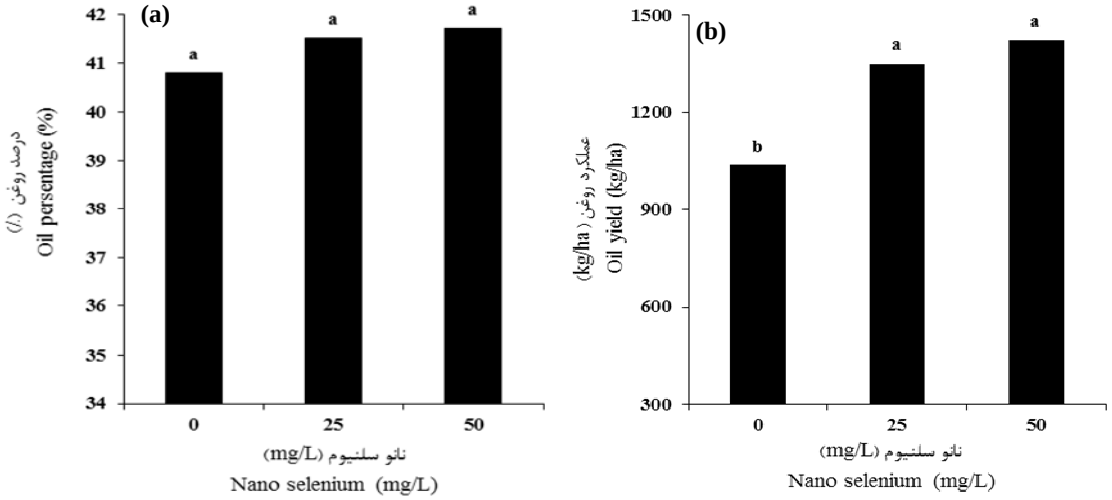
شکل ۳- تاثیر نانوسلنیوم بر شاخه‌ی فرعی (a)، تعداد خورجین در بوته (b)، تعداد دانه در خورجین (c)، وزن هزار دانه (d) کلزای پاییزه

Figure 3- Effect of selenium nanoparticles on number of branch (a), number of pod per plant (b), number of seed per pod (c) and 1000 grain weight (d) of oilseed rape



شکل ۴- تاثیر نانوسلنیوم بر عملکرد کل در واحد سطح (a)، عملکرد دانه در واحد سطح (b) و شاخص برداشت (c) کلزای پاییزه

Figure 4- Effect of selenium nanoparticles on biological yield (a), grain yield (b) and harvest index (c) of oilseed rape



شکل ۵- تاثیر نانوسلنیوم بر درصد روغن (a) و عملکرد روغن (b) دانه‌های کلزای پاییزه

Figure 5- Effect of selenium nanoparticles on oil persentage (a) and oil yield (b) of oilseed rape seeds

References منابع مورد استفاده

- Ajiboso, S.O., and G.A. Adenuga. 2012. The influence of zinc and selenium on some biochemical responses of *Vigna unguiculata* and *Zea mays* to water deficit condition and rehydration. *An International Journal of the Nigerian Society for Experimental Biology*. 24(3): 108-115.
- Alda, S., M. Camelia, T. Cristina-Elena, P. Mirela, R. Diana, and D. Delia. 2011. The influence of sodium selenite on biometric parameters of wheat, barley and oat seedlings. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*. 15(4): 8- 12
- Amerian, M., F. Dashti, and M. Delshad. 2015. Effect of different sources and levels of selenium on growth and some physiological characteristics of Onion (*Allium cepa* L.). *Plant Production Technology*. 6(2): 163-179. (In Persian).
- Anonymous. 2017. ISTA (International Seed Testing Association) International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, Switzerland.
- Anonymous. 2019. FAO. Food outlook. Global market analysis. http://www.fao. foodoutlook.comArnon, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 24: 1-24.
- Aytac, Z., N. Gulmezoglu, Z. Sirel, I. Tolay, and A. Torun. 2014. The effect of zinc on yield, yield components and micronutrient concentrations in the seeds of safflower genotypes *(Carthamus tinctorius* L.*). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 42(1): 202-208.
- Boldrin, P.F., V. Faquin, S.J. Ramos, K.V.F. Boldrin, F.W. Ávila, and L.R.G. Guilherme. 2014. Soil and foliar application of selenium in rice bio fortification. *Journal of Food Composition and Analysis*. 31(2): 238-244.
- Bybordi, A. 2016. Effect of zeolite and solubility of selenium, silicon on yield, yield components and some physiological properties of canola under stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research.* 14(1): 154-170. (In Persian).
- Dadnia, M. 2018. Wheat Response (*Triticum aestivum* L.) to selenium under normal irrigation and water deficit conditions. *Journal of Crop Ecophysiology.* 12(1): 36-21. (In Persian).
- Davoudi, A., B. Mirshekari, A. Shirani Rad, F. Farahvash, and V. Rashidi. 2018. Effect of selenium on yields, yield components and oil yield of different rapeseed genotypes under normal and delayed planting conditions. *Journal of Plant Ecophysiology*. 10(34): 121-131. (In Persian).
- Davoudi, A., H. Zeinalzadeh-Tabrizi, and A. Shirani-Rad. 2020. Effect of selenium foliar application on some quantitative and qualitative characteristics of rapeseed cultivars under end-season thermal stress. *Journal of Crop Breeding.* 11(32): 74-87. (In Persian).
- Djanaguiraman, M., D. Durga Devi, A.K. Shanker, J.A. Sheeba, and U. Bangarusamy. 2005. Selenium-an antioxidative protectant in soybean during senescence. *Plant and Soil*. 272: 77- 86.

- Ekanayake, L.J., D. Thavarajah, E. Vial, B. Schatz, R. McGee, and P. Thavarajah. 2015. Selenium fertilization on lentil (*Lens culinaris* Medikus) grain yield, seed selenium concentration, and antioxidant activity. *Field Crop Research.* 177: 9-14.
- Elemike, E., I.M. Euzoh, D.C. Onwudiwe, and O.O. Babalola. 2019. The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. *Applied Sciences*. 9(3): 1-32.
- Feng, R., C. Wei, and S. Tu. 2013. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and Experimental Botany*. 87: 58–68.
- Ghasemi, Y., K. Ghasemi, H. Pirdashti, and R. Asgharzadeh. 2016. Effect of selenium enrichment on the growth, photosynthesis and mineral nutrition of broccoli. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 8(2): 199-203.
- Haghani, N., M. Amerian, and M. Khorami Vafa. 2020. The effect of drought stress and selenium on some growth and physiological characteristics of isfahan yellow landrace onions (*Allium cepa* L.). *Journal of Crop Ecophysiology*. 14(1): 63-84. (In Persian).
- Haghighi, M., and J.A. Teixeira da Silva. 2016. Influence of selenium on cadmium toxicity in cucumber (*Cucumis sativus* cv.4200) at an early growth stage in a hydroponic system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2(47): 142-155.
- Han, D., X. Li, S. Xiong, S. Tu, Z. Chen, J. Li, and Z. Xie. 2013. Selenium uptake, speciation and stressed response of *Nicotiana tabacum* L. *Environmental and Experimental Botany*. 95: 6-14.
- Hasanuzzaman, M., M.A. Hossain, and M. Fujita. 2010. Selenium in higher plants: physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance. *Journal of Plant Sciences*. 5(4): 354-375.
- Holaday, A.S., S.W. Ritchiet, and H.T. Nguyen. 1992. Effects of water deficit on gas-exchange parameters and ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase activation in wheat. *Environmental and Experimental Botany*. 32(4): 403-410.
- Jiang, C., C. Zu, J. Shen, F. Shao, and T. Li. 2015. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 84(1): 71–77.
- Kashin, V.K., and O.I. Shubina. 2011. Biological effect and selenium accumulation in wheat under conditions of selenium deficient biogeochemical province. *Chemistry for Sustainable Development.* 19: 145-150.
- Kraljic´, K., D. Sˇkevin, M. Pospisˇil, M. Obranovic´, and S. Nederal. 2013. Quality of rapeseed oil produced by conditioning seeds at modest temperatures. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 90: 589-599.
- Madani, A., A.H. Makarem, F. Vazin, and M. Joudi. 2012. The impact of post-anthesis nitrogen and water availability on yield formation of winter wheat. *Plant, Soil and Environment.* 58(1): 9-14.

- Mohamadipoor, R., S. Sedaghathoor, and A. Mahboub Khomami. 2013. Effect of application of iron fertilizers in two methods 'foliar and soil application' on growth characteristics of *Spathyphyllum illusion*. *European Journal of Experimental Biology*. 3(1): 232-240.
- Molazem, D., J. Azimi, and T. Dideban. 2013. Measuring the yield and its components, in the canola in different planting date and plant density of the West Guilan. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences.* 6: 869-872.
- Nawaz, F., R. Ahmad, M.Y. Ashraf, E.A. Waraich, and S.Z. Khan. 2015. Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 113:191-200.
- Nazemi, L., S. Nazmara, M.R. Eshraghyan, S. Nasseri, K. Djafarian, M. Yunesian, H. Sereshti, A. Moameni, and S.J. Shahtaheri. 2012. Selenium status in soil, water and essential crops of Iran. *Iranian Journal of Environmental Health Sciences and Engineering*. 9(11): 1-8. (In Persian).
- Nour Ali, S., and H. Madani. 2017. Improvement of some physiological traits, yield and yield components of wheat and barley by using sodium selenate and sodium selenite in dry land conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*. 11(1): 17-30. (In Persian)
- Peyvandi, M., H. Parande, and M. Mirza. 2011. Comparison of nano Fe chelate with Fe chelate effect on growth parameters and antioxidant enzymes activity of *Ocimum basilicum*. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*. 1(4): 89-98. (In Persian).
- Poldma, P., U. Moor, T. Tonutare, K. Herodes, and R. Rebane. 2013. Selenium treatment under field conditions affects mineral nutrition, yield and antioxidant properties of bulb onion (*Allium cepa* L.). *Acta Scientiarum Polonorum- Hortorum Cultus*. 12(6): 167-181.
- Prasad, T.N.V.K.V., P. Sudhakar, Y. Sreenivasulu, P. Latha, V. Munaswamy, K. Raja Reddy, T.S. Sreeprasad, P.R. Sajanlal, and T. Pradeep. 2012. Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition.* 35(6): 905-927.
- Rameeh, V. 2012. Evaluation of the planting dates effects on yield and yield associated traits in rapeseed advanced lines. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*. 1(1): 7-11.
- Rodrigo, S., O. Santamaria, F.J. Lopez-Bellido, and M.J. Poblaciones. 2013. Agronomic selenium bio fortification of two-rowed barley under Mediterranean conditions. *Plant, Soil and Environment.* 3(3): 115-120.
- Saffaryazdi, A., M. Lahouti, A. Ganjeali, and H. Bayat. 2012. Impact of selenium supplementation on growth and selenium accumulation on spinach (*Spinacia oleraceae* L.) plants. *Notulae Scientia Biologicae*. 4: 95-100.
- Schiavon, M., S. Acqua, A. Mietto, E.A. Pilon-Smits, P. Sambo, A. Masi, and M. Malagoli. 2013. Selenium fertilization alters the chemical composition and

antioxidant constituents of tomato (*Solanum lycopersicon* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61(44): 10542-10554.

- Seppänen, M., M. Turakainen, and H. Hartikainen. 2003. Selenium effects on oxidative stress in potato. *Plant Science*. 165(2): 311-319.
- Shedeed, S.I., Z.F. Fawzy, and A.E.M. El-Bassiony. 2018. Nano and mineral selenium foliar application effect on pea plants (*Pisum sativum* L.). *Bioscince Research*. 15(2): 645-654.
- Singh, R., A.K. Upadhyay, and D.P. Singh. 2018. Regulation of oxidative stress and mineral nutrient status by selenium in arsenic treated crop plant *Oryza sativa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 148: 105-113.
- Talukdar, D. 2013. Selenium priming selectively ameliorates weed–induced phytotoxicity by modulating antioxidant defense components in Lentil (*Lens culinaris* Medik.) and Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.). *Annual Research and Review in Biology*. 3(3): 195-212.
- Thavarajah, D., P. Thavarajah, E. Vial, M. Gebhardt, C. Lacher, S. Kumar, and G.F. Combs. 2015. Will selenium increase lentil (*Lens culinaris* Medik) yield and seed quality? *Frontiers in Plant Science*. 6: 356-364.
- Wang, Y., Y. Hu, Y. Duan, R. Feng, and H. Gong. 2016. Silicon reduces long-term cadmium toxicities in potted garlic plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 38(8): 211-216.

Research Article DOI: 10.30495/jcep.2021.687014

Improvment of Physiological and Agronomic Characteristics of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.) with Nano-Selenium Application

Gholam Behzad[1], Parisa Sheikhzadeh[2*], Nasser Zare[2] and Mitra Rostami[3]

Received: July 2020 , Revised: 13 February 2021, Accepted: 28 March 2021

Abstract

To investigate the effect of foliar selenium nanoparticle applications on the agronomic and yield characteristics of winter oilseed rape, with three levels (0 (control), 25 and 50 mg.L^{-1}) at two growth stages (6-8 leaves and 50% flowering) at the research farm station of the University of Mohaghegh Ardabili during 2018-2019 was studied. The results showed that the selenium nanoparticle applications increased the photosynthetic pigments and the relative water content (RWC) of the leaves significantly. Foliar spraying with 50 mg.L^{-1} selenium nanoparticle increased in the chlorophyll a and b and total chlorophyll content by 37.04, 44.51 and 39.68%, respectively, as compared to the control treatment. On the other hands, selenium nanoparticle application increased the plant height, number of branches and stem diameter via improving the photosynthetic pigments content and RWC of winter oilseed rape significantly. The biological yield, harvest index and seed oil content of 25 and 50 mg.L^{-1} of selenium nanoparticle treatments were significantly higher than those of the control. The foliar spraying of oilseed rape plants with selenium nanoparticle applications improved the grain yield throught increase in the number of pods per plant, the number of seeds per pod and the 1000 grain weight significantly. Thus, the highest improvement in the grain yield per unit area (about 34.16 %) was obtained with application of 50 mg.L^{-1} selenium nanoparticles in comparison with control treatment. In general, the application of 50 mg.L^{-1} selenium nanoparticles had a positive and significant effect on the physiological (photosynthetic pigments content and RWC) and agronomical characteristics at plants, as to the plant height, branches number, stem diameter, the number of pods per plant, the number of seeds per pod, the 1000-grain weight and seed oil content of winter rape.

Key words: Chlorophyll, Grain yield, Oilseed crop, Selenium nanoparticles.

1- MS.c. Graduated Student of Plant Physiology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.
2- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
3- Lecturer at Ardabil University of Applied Sciences, Ardabil, Iran.
**Corresponding Author: sheikhzadehmp@gmail.com*