

اثر نانوسریم (CeO₂) و نیتروپروساید سدیم (SNP) بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گندم رقم پیشگام تحت تنش خشکی

جواد فرجی^۱، علی سپهری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶)

چکیده

به منظور ارزیابی تاثیر نانوذره سریم و نیتروپروساید سدیم بر شاخص‌های جوانه‌زنی، بیوشیمیایی و رشد گندم رقم پیشگام تحت تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. اثرات نانوذره سریم در غلظت‌های ۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و نیتروپروساید سدیم به عنوان آزادکننده اکسید نیتریک در غلظت‌های ۰ و ۱۰۰ میکرومولار تحت سطوح تنش خشکی ۰، -۰/۴ و -۰/۸ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار اکثر صفات مرتبط با جوانه‌زنی از جمله درصد و سرعت جوانه‌زنی گردید، همچنین خشکی باعث افزایش میانگین زمان جوانه‌زنی، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و محتوی مالون دی‌آلدهید در گیاهچه‌های گندم شد. کاربرد همزمان نانوذره سریم و نیتروپروساید سدیم بر اغلب صفات مورد مطالعه تاثیر معنی‌داری داشت. کاربرد نانوسریم (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به همراه نیتروپروساید سدیم درصد جوانه‌زنی و شاخص بینه بذر را به ترتیب ۴۴/۵ و ۷۵/۵ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸ مگاپاسکال افزایش داد. تیمار مذکور تحت تنش خشکی ۰/۸ مگاپاسکال، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز را به ترتیب ۱۹/۷ و ۴۱/۱ درصد افزایش و میزان مالون دی‌آلدهید گیاهچه گندم را ۳۳/۵ درصد کاهش داد. به نظر می‌رسد کاربرد نیتروپروساید سدیم و همچنین نانوسریم از طریق بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی موجب کاهش اثرات مضر تنش خشکی بر گیاهچه گندم می‌شود.

کلمات کلیدی: اکسید نیتریک، تنش اکسیداتیو، جوانه‌زنی، گندم، نانوسریم.

Effect of nanoceria (CeO₂) and sodium nitroprusside (SNP) on germination and seedling growth of Pishgam wheat variety under drought stress

J. Faraji¹, A. Sepehri^{2*}

1-PhD Student in Crop Physiology, Agronomy and Plant Breeding Department, Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan

2-Associate professor of Agronomy and Plant Breeding Department, Agriculture Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan

(Received: Jul. 26, 2017 – Accepted: Mar. 18, 2018)

Abstract

A factorial experiment with three replications was conducted based on CRD to evaluate the influence of nanoceria and sodium nitroprusside in improving germination and biochemical characteristics of wheat (var. Pishgam) under drought stress. The effects of nanoceria including 0, 500, 1000 and 2000 mg L⁻¹ as well as 0 and 100 μM sodium nitroprusside as NO donor were studied under levels of drought stress (0, -0.4 and -0.8 MPa). Drought stress increased MGT, the activity of SOD, CAT and APX enzymes and MDA content in wheat seedlings but reduced other studied parameters such as germination percentage and germination rate. Simultaneous application of nanoceria and sodium nitroprusside significantly affected some studied parameters. Application of nanoceria (1000 mg L⁻¹) + sodium nitroprusside enhanced germination percentage and seed vigor index by 44.5 and 75.5 percent respectively under -0.8 MPa drought stress. Aforementioned treatment also improved the activity of SOD and APX by 19.7 and 41.1 percentage respectively and decreased MDA content in wheat seedling by 33.5 percentage under -0.8 MPa drought stress. It seems that sodium nitroprusside and nanoceria alleviates the adverse effects of drought stress on wheat seedling via improving germination indices and promoting antioxidant defense system.

Keywords: Germination, Nanoceria, Nitric oxide, Oxidative stress, wheat

* Email: a_sepehri@basu.ac.ir

مقدمه

می‌شود (Siddiqui et al., 2011). گزارش شده اکسید نیتریک به طور مستقیم باعث حذف گونه‌های فعال اکسیژن شده و از سوی دیگر با تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، به طور غیرمستقیم موجب کاهش اثرات تنش اکسیداتیو القا شده توسط خشکی می‌گردد (Krasylenko et al., 2010). در همین رابطه تیان و لی (Tian and Lei, 2006) اظهار نمودند کاربرد ۰/۲ میلی‌مولار نیتروپروپیل سدیدیم از طریق کاهش محتوی پراکسید هیدروژن و مالون دی‌آلدهید و افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز اثرات منفی تنش خشکی در گندم (رقم w7) را کاهش داده است. تنش خشکی یکی از مهمترین تنش‌های غیرزیستی است که از طریق کاهش جذب آب توسط بذر موجب اختلال در فرآیند جوانه‌زنی و استقرار ضعیف گیاهچه می‌شود (Moradi et al., 2015). کمبود آب همچنین باعث تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن و در نهایت بروز تنش اکسیداتیو در گیاهچه‌ها می‌شود (Sharma et al., 2012).

در میان گیاهان زراعی گندم به عنوان مهمترین محصول زراعی در مرحله جوانه‌زنی، سبز شدن و مراحل ابتدایی رشد با بروز تنش خشکی مواجه می‌شود. در برخی موارد تنش خشکی بر جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه گندم اثرات جبران ناپذیری داشته و در نهایت رشد و عملکرد گیاه را به صورت معنی‌داری کاهش می‌دهد (Saeidi et al., 2014). بنابراین اتخاذ راه‌کارهایی که موجب تحمل گندم به تنش خشکی در مراحل مذکور شوند ضروری به نظر می‌رسد (Abdi et al., 2015). در حال حاضر پژوهش‌هایی در زمینه تاثیر نانو سیریم بر مراحل اولیه رشد گیاهان زراعی انجام شده (Andersen et al., 2016) ولی اثر نانو ذره سیریم در تنش‌های محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Rossi et al., 2016). پژوهش حاضر به بررسی اثرات نانو ذره سیریم و نیتروپروپیل سدیدیم بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌ای گندم تحت تنش خشکی می‌پردازد.

ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی، شیمیایی و زیستی نانو ذرات موجب کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف از جمله کشاورزی شده است. از این رو در سال‌های اخیر مطالعه اثر نانو ذرات، بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی مورد توجه محققین قرار گرفته است (Trujillo-Reyes et al., 2014). در میان عناصر کمیاب سیریم به عنوان فراوان‌ترین عنصر در پوسته زمین شناخته شده است (Mattiello et al., 2016). علاوه بر این، نانو سیریم (CeO_2) در لیست ۱۰ نانو ذره‌ای قرار دارد که سالانه بیشترین میزان تولید را در جهان به خود اختصاص می‌دهد. به همین دلیل به عنوان نانو ذره دارای اولویت تحقیق در گیاهان زراعی مهم از جمله گندم معرفی شده است (Piccinno et al., 2012). به گزارش ریکو و همکاران (Rico et al., 2014)، نانو ذرات سیریم رشد، بیوماس اندام هوایی و عملکرد گندم را به ترتیب ۹، ۱۲ و ۳۶ درصد افزایش می‌دهد. همچنین نانو سیریم موجب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی در بذور یولاف (*Avena ludoviciana* L.)، آرابیدوپسیس (*Arabidopsis thaliana*) ذرت (*Zea mays* L.) و یونجه (*Medicago sativa* L.) شده است (Lopez-Moreno et al., 2010; Tumburu et al., 2015; Andersen et al., 2016). از سوی دیگر تاثیر معنی‌دار نانو ذره سیریم بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در گیاه ذرت اثبات شده است (Zhao et al., 2012). به طوری که نانو ذره سیریم قادر است مشابه آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت عمل نموده و موجب حذف گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) گردد (Anandkumar et al., 2015).

اثبات شده بسیاری از فرآیندهای گیاهی از جمله رشد و گسترش سلولی به ویژه هنگام تنش‌های محیطی از طریق مولکول‌های پیام رسان فعال یا غیرفعال می‌شوند. اکسید نیتریک (NO) به عنوان یک مولکول پیام رسان در بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی نقش داشته و به عنوان کاهنده اثرات منفی تنش‌های محیطی در گیاهان شناخته

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر نانو سربیم و نیتروپروساید سدیم بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم رقم پیشگام تحت تنش خشکی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در دانشگاه بوعلی سینا با سه تکرار انجام شد. نانوذره سربیم در چهار سطح (۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و نیتروپروساید سدیم به عنوان آزادکننده اکسید نیتریک در دو سطح (۰ و ۱۰۰ میکرومولار) تحت سطوح خشکی (۰، ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال) مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور اعمال تنش خشکی از محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ استفاده شد (Michel and Kaufmann, 1973). نانوذره سربیم (با خلوص ۹۹/۹۷ درصد و اندازه ذرات بین ۱۰ تا ۳۰ نانومتر) از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه گردید. بذر گواهی شده گندم رقم پیشگام از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. پیش از شروع آزمایش، بذرها با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد به مدت یک دقیقه ضد عفونی شده و با آب مقطر شسته شدند. به منظور تهیه محلول یکنواخت از نانوذره سربیم، محلول مذکور قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شد.

آزمایش جوانه‌زنی در تاریکی و در دمای ۲۵±۱ درجه سانتی‌گراد (Sajedi et al., 2016; Rahemikarizaki et al., 2015; Saeidi et al., 2014)، در محیط ژرمیناتور انجام گرفت و شمارش بذرها به صورت روزانه انجام شد. معیار جوانه‌زنی خروج ریشه‌چه به اندازه دو میلی‌متر بود. در پایان آزمایش پس از اندازه‌گیری طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن تر بخش‌های مذکور تعیین گردید. برای محاسبه درصد جوانه‌زنی از رابطه (۱) استفاده شد (Bajji et al., 2002).

$$GP = \left(\frac{Ni}{N} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن Ni تعداد کل بذرها، جوانه‌زده در روز

آخر شمارش و N تعداد کل بذرها است.

به منظور محاسبه سرعت جوانه‌زنی از رابطه (۲) استفاده گردید (Khan and Ungar, 1984).

$$GR = \sum \frac{n_i}{n_i d_i} \quad (2)$$

که در آن n_i تعداد بذرها، جوانه‌زده در شمارش iام، d_i روز جوانه‌زده در شمارش iام و N تعداد بذرها، کشت شده است.

محاسبه میانگین جوانه‌زنی از رابطه (۳) صورت گرفت (Ellis and Roberts, 1981).

$$MGT = \sum (n \times d) / N \quad (3)$$

که در آن n تعداد روزها از شروع جوانه‌زنی، d تعداد بذور جوانه‌زده در هر روز و N تعداد کل بذور جوانه‌زده است. شاخص بنیه بذر از رابطه (۴) محاسبه شد (Vashisth and Nagarajan, 2010).

$$VI = GP (\%) \times SL \quad (4)$$

که در آن GP درصد جوانه‌زنی و SL طول گیاهچه است.

برای محاسبه انرژی جوانه‌زنی از رابطه (۵) استفاده شد (Amooghaie et al., 2015).

$$\text{انرژی جوانه‌زنی} = \frac{\text{تعداد بذور جوانه‌زده تا روز سوم}}{\text{تعداد کل بذور}} \quad (5)$$

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) با روش گیانوپولیتیس و ریس (Giannopolitis and Ries, 1977) انجام شد. مخلوط واکنش برای سنجش فعالیت آنزیم شامل بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار، متیونین ۰/۰۱۳ مولار، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و ربیوفلاوین ۲ میکرومولار بود که در تاریکی کامل نگهداری شد. بلافاصله پس از اضافه کردن ربیوفلاوین، ۳ میلی‌لیتر از آن را درون لوله آزمایش

مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

شاخص‌های جوانه‌زنی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر متقابل سه گانه نانوسریم، تنش خشکی و نیتروپروساید سدیم بر درصد جوانه‌زنی بذور گندم در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). سطوح مختلف تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار درصد جوانه‌زنی بذور گردید و میزان کاهش با تشدید پتانسیل اسمزی رابطه مستقیم داشت. سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال به ترتیب ۳۸ و ۵۷/۴۱ درصد، جوانه‌زنی بذور را نسبت به شاهد کاهش دادند (جدول ۲). گزارش شده تنش خشکی با محدود کردن جذب آب توسط بذر و تاثیر بر ساختمان پروتئین‌ها، انتقال ذخایر بذر به جنین را دچار مشکل کرده و درصد جوانه‌زنی را کاهش می‌دهد (Abdi et al., 2015). در آزمایش حاضر کاربرد نیتروپروساید سدیم در حضور نانوسریم موجب افزایش درصد جوانه‌زنی گردید. در بین تیمارهای مورد بررسی استفاده همزمان از نیتروپروساید سدیم و نانوسریم (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بیشترین درصد جوانه‌زنی را در سطوح مختلف خشکی به خود اختصاص داد (جدول ۲). به نظر می‌رسد نانوذره سریم از طریق تسهیل در جذب آب (Qu et al., 2013) و تسریع رشد و نمو سلولی (Mandeh et al., 2012) منجر به افزایش درصد جوانه‌زنی بذور گندم شده است. همچنین گزارش شده برخی نانوذرات از طریق ایجاد واکنش‌های اکسیداسیون-احیا با یون سوپر اکسید، موجب حذف گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش شده، اکسیژن حاصل از چنین واکنش‌هایی در فرآیند تنفس مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت درصد جوانه‌زنی بذر افزایش می‌یابد (Khot et al., 2012). از سوی دیگر در

ریخته و به هر لوله ۱۰۰ میکرولیتر نمونه عصاره پروتئینی اضافه شد. لوله‌های آزمایش به مدت ۱۶ دقیقه در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از منبع نور قرار گرفتند و در این فاصله دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۶۰ نانومتر و توسط محلول تاریکی به عنوان شاهد تنظیم شد. پس از ۱۶ دقیقه جذب نمونه‌ها در طول موج مذکور قرائت شد. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز براساس واحد آنزیمی به ازای هر میلی‌گرم پروتئین برای تمام نمونه‌ها محاسبه گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) نیز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با روش آبی (Aebi, 1984) اندازه‌گیری شد. برای سنجش میزان فعالیت آنزیم از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر استفاده شد. نوع و میزان مواد لازم برای سنجش آنزیم کاتالاز شامل ۳۰۰ میکرولیتر بافر فسفات (PH=7) ۵۰ میلی‌مولار، ۵ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیم بود. فعالیت آنزیم به مدت ۵ دقیقه در فواصل ۲۰ ثانیه‌ای با استفاده از ضریب خاموشی ۳۹/۴ میلی‌مول بر سانتی‌متر محاسبه و به صورت واحد بر میلی‌گرم پروتئین بیان شد. فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) با روش ناکانو و آسادا (Nakano and Asada, 1987) اندازه‌گیری شد. در اثر واکنش بین آسکوربات پراکسیداز و آسکوربیک اسید و پراکسید هیدروژن، دهیدروآسکوربات تولید می‌شود که در طول ۲۹۰ نانومتر قرائت گردید. محیط واکنش حاوی ۶۰۰ میکرولیتر از EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، ۱۵۰۰ میکرولیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار (PH=7)، ۴۰۰ میکرولیتر آسکوربیک اسید ۰/۵ میلی‌مولار، ۴۰۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. فعالیت آنزیم در طول ۳ دقیقه با فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای با استفاده از ضریب خاموشی ۲/۸ میلی‌مول بر سانتی‌متر محاسبه و به صورت واحد بر میلی‌گرم پروتئین بیان شد. همچنین اندازه‌گیری محتوی مالون دی‌آلدئید به روش هیث و پاکر (Heath and Packer, 1968) انجام شد. تجزیه آماری داده‌های بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS (۹/۱) و

جوانه زنی مانند آنزیم های هیدرولیز کننده نشاسته (Bialecka and Kępczyński, 2010) و تاثیر آن بر بیان ژن های مرتبط با آکوپورین ها و افزایش ظرفیت بذر برای جذب آب در طی فرآیند آبنوشی نسبت داد (Liu et al., 2007).

با توجه به نتایج به دست آمده، علاوه بر اثرات اصلی نانو سربیم، نیتروپروساید سدیم و خشکی، اغلب برهمکنش های دو گانه عوامل آزمایش بر سرعت و میانگین جوانه زنی بذور تاثیر معنی داری داشتند (جدول ۱). در برهمکنش نانو سربیم و تنش خشکی مشاهده می شود در تنش ۰/۴- مگاپاسکال، غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانو سربیم و در تنش ۰/۸- مگاپاسکال، غلظت های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانو سربیم بیشترین سرعت جوانه زنی را داشتند (جدول ۳). همچنین نیتروپروساید سدیم موجب افزایش معنی دار سرعت جوانه زنی بذور گندم در سطوح مختلف تنش خشکی گردید (جدول ۴).

هنگام تنش خشکی ساخت پروتئین های کانال آبی موسوم به آکوپورین ها تحریک می شود. حضور آکوپورین ها در غشای پلاسمایی و غشای واکوئل باعث تسهیل حرکت آب بین غشاها و افزایش نفوذ پذیری آب تا حدود ۱۰ الی ۲۰ برابر می شود (Zangi and Filella, 2012). آکوپورین ها به عنوان مسیری در جهت جذب نانوذرات توسط گیاهان شناخته شده به طوری که افزایش ساخت این نوع پروتئین ها تحت تاثیر نانوذرات تایید شده است (Khodakovskaya et al., 2012). از این رو افزایش درصد جوانه زنی بذرها در حضور نانو سربیم می تواند بدلیل افزایش سرعت جذب آب در چنین شرایطی باشد. نیتروپروساید سدیم نیز قادر است بر فرآیند جوانه زنی تاثیر گذاشته و موجب تسریع و بهبود جوانه زنی بذرها شود (Liu et al., 2007). افزایش درصد جوانه زنی بذرها تیمار شده با نیتروپروساید سدیم را می توان به نقش اکسید نیتریک بر افزایش فعالیت آنزیم های موثر در

جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی گندم تحت تاثیر نانو سربیم، نیتروپروساید سدیم و تنش خشکی.

Table 1- Analysis of variance for studied traits of wheat under CeO₂, SNP and drought stress.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	درصد جوانه زنی Germination %	سرعت جوانه زنی Germination rate	انرژی جوانه زنی Germination energy	میانگین زمان جوانه زنی Mean germination time	شاخص بیدار Seed vigor index	طول ریشه چه Radicle length	طول ساقچه Plumule length	وزن تر ریشه چه Radicle Fresh weight	وزن تر ساقچه Plumule Fresh weight	سوپراکسید دیسمو تاز SOD	آسکوربات پراکسیداز APX	کاتالاز CAT	محتوی مالون دی آلدهید MDA content
خشکی Drought (D)	2	10675.90**	16.60**	13694.32**	6.09**	207282125**	335.88**	342.44**	2139.79**	1732221**	767.35**	3.91**	12615473*	592.48**
نانو سربیم Nanoceria (C)	3	10.44**	1.32**	1028.00**	0.48**	1762341.21**	33.88**	33.82**	211.40**	1053.65**	20.51**	0.38**	6260.83**	34.45**
نیتروپروساید سدیم SNP (T)	1	1479.86**	1.49**	1163.15**	0.54**	1369250.47**	27.83**	20.20**	126.16**	1141.14**	33.97**	0.32**	9995.56**	64.24**
خشکی × نانو سربیم D×C	6	124.92**	0.18*	146.23**	0.06**	127382.86**	3.19*	3.79**	23.68**	106.88**	2.30*	0.01*	683.73**	4.39*
خشکی × نیتروپروساید سدیم D×T	2	302.66**	0.19*	149.16*	0.07*	185984.07**	5.48**	1.59*	10.00*	106.46*	3.94*	0.05**	1395.01**	16.92**
نانو سربیم × نیترو پروساید سدیم C×T	3	15.65**	0.01**	52.08**	0.005**	19091.14*	0.25**	0.61**	3.83**	14.72**	1.83**	0.01*	527.31*	2.24**
خشکی × نانو سربیم × نیتروپروساید سدیم D×C×T	6	68.56*	0.03**	6.67**	0.01**	16181.69*	0.11**	0.44**	2.80**	5.09**	2.43**	0.01*	121.30**	4.06**
خطا Error	48	26.40	0.06	43.88	0.01	6719.35	1.06	0.53	3.34	28.91	0.87	0.005	192.18	1.82
ضریب تغییرات (%) CV (%)	-	7.07	8.58	10.15	7.54	5.76	11.28	8.29	8.34	9.08	7.37	7.96	6.85	8.41

ns, * and ** are Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

ns, * and ** are Non-significant and significant at the 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسریم، نیتروپرووساید سدیم و تنش خشکی بر صفات مورد بررسی در گیاهچه گندم.

Table 2- Mean comparison of interaction effect of nanoceria, SNP and drought stress on studied wheat seedling traits

تیمارها Treatments			درصد جوانه‌زنی Germination percentage	شاخص نبه بذر Seed vigor index	فعالیت سوپراکسید دیسمنوتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) Superoxide dismutase activity (Units [mgpr ⁻¹])	فعالیت آسکوربات پراکسیداز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) Ascorbate peroxidase activity (Units [mgpr ⁻¹])	محتوی مالون دی‌آلدهید (نانو مول بر گرم وزن تر) Malondialdehyde content (nmol [gfw ⁻¹])
تنش خشکی (مگاپاسکال) Drought stress (MPa)	نانوسریم (میلی‌گرم در لیتر) Nanoceria (mg L ⁻¹)	نیتروپرووساید سدیم (میکرومولار) SNP (μM)					
0	0	0	90.57 abc	2157.61 d	6.69 l	0.52 l	12.12 jk
		100	89.43 abcd	2165.91d	7.03 l	0.58 lk	11.31 jk
	500	0	95.10 ab	2392.81 bc	6.99 l	0.70 ijk	10.91 k
		100	95.89 ab	2502.20 b	6.99 l	0.71 ij	10.70 k
	1000	0	96.98 a	2700.22 a	8.78 jk	0.76 i	10.24 k
		100	97.84 a	2806.87 a	9.41 ij	0.78 i	9.90 k
2000	0	88.13 bcde	2317.48 c	6.57 l	0.61 jkl	11.11 jk	
	100	91.23 abc	2419.87 bc	7.43 kl	0.68 ijk	10.14 k	
- 0.4	0	0	56.15 h	512.90 h	9.20 ij	0.77 i	19.73 cd
		100	81.01 de	1036.58 f	11.71 fgh	1.00 h	17.85 defg
	500	0	67.18 fg	1092.65 f	11.42 gh	1.06 gh	15.21 hi
		100	80.33 e	1575.55 e	13.09 ef	1.23 ef	17.34 efgh
	1000	0	84.39 cde	1647.90 e	13.11 ef	1.17 fg	15.84 gh
		100	93.42 ab	2057.46 d	14.07 e	1.34 de	13.31 ij
2000	0	59.00 gh	826.43 g	10.58 hi	0.99 h	18.31 def	
	100	67.34 fg	1110.90 f	12.13 fg	0.98 h	15.39 hi	
- 0.8	0	0	38.75 k	277.91 i	17.93 cd	1.06 gh	24.25 a
		100	47.49 j	498.05 h	19.73 b	1.39 cd	19.50 cde
	500	0	54.34 hij	528.52 h	18.76 bc	1.55 b	22.76 ab
		100	62.12 fgh	867.69 g	18.83 bc	1.56 b	18.24 def
	1000	0	48.20 ij	618.93 h	17.59 cd	1.50 bc	19.84 cd
		100	69.87 f	1136.72 f	22.34 a	1.80 a	16.12 fgh
2000	0	37.82 k	348.77 i	16.58 d	1.33 de	23.47 ab	
	100	49.43 ij	554.02 h	17.93 cd	1.60 b	21.33 bc	

بر اساس آزمون LSD، میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column means followed by the same letter are not significantly different at the $P \leq 0.05$ level according to LSD test.

غلظت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسریم در سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال، موجب کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی شدند (جدول ۳). در مقابل غلظت ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسریم تحت پتانسیل اسمزی ۰/۸- مگاپاسکال موجب افزایش میانگین زمان جوانه‌زنی بذر گندم در مقایسه با تیمار شاهد گردید (جدول ۳). کاربرد نیتروپرووساید سدیم موجب تسریع سرعت جوانه‌زنی بذور و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی گندم گردید (جدول ۴). تیمار ۱۰۰ میکرومولار نیتروپرووساید سدیم میانگین زمان جوانه‌زنی را ۱۶/۴ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال کاهش داد (جدول ۴). در شروع جوانه‌زنی چنانچه جذب آب به کندی صورت گیرد، فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی بذر به آرامی صورت گرفته در نتیجه مدت زمان خروج ریشه‌چه

جوانه‌زنی بذور و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی گندم گردید (جدول ۴). تیمار ۱۰۰ میکرومولار نیتروپرووساید سدیم میانگین زمان جوانه‌زنی را ۱۶/۴ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال کاهش داد (جدول ۴). در شروع جوانه‌زنی چنانچه جذب آب به کندی صورت گیرد، فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی بذر به آرامی صورت گرفته در نتیجه مدت زمان خروج ریشه‌چه

جوانه‌زنی بذرها شد. اکسید نیتریک قادر است از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیزکننده نشاسته سبب تسریع در تجزیه و انتقال مواد اندوخته‌ای شده و سرعت جوانه‌زنی را افزایش دهد (Białecka and Kepczyński, 2010).

با توجه به جدول ۱، علاوه بر اثرات اصلی فاکتورهای نانوسریم، نیتروپرووساید سدیم و تنش شوری، اثر متقابل دوگانه نانوسریم با خشکی و برهمکنش نیتروپرووساید سدیم در خشکی بر طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه گندم معنی‌دار بودند. غلظت‌های مختلف نانوسریم به جز ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر موجب افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم تحت سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال شد (جدول ۳). همچنین استفاده از نیتروپرووساید سدیم طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم را به ترتیب ۲۸/۷ و ۲۰/۷ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال افزایش داد (جدول ۴).

از بذر افزایش و سرعت جوانه‌زنی کاهش می‌یابد (Mojab *et al.*, 2010). عبدی و همکاران (Abdi *et al.*, 2015) گزارش نمودند تنش خشکی ناشی از پلی‌اتیلن گلابیکول موجب کاهش سرعت جوانه‌زنی و افزایش میانگین جوانه‌زنی در ۴۰ ژنوتیپ گندم نان شده است. نانوذره سریم نیز موجب افزایش سرعت جوانه‌زنی و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی در بذر یولاف (Andersen *et al.*, 2016) و آراییدوپسیس (Tumburu *et al.*, 2015) شده است. افزایش سرعت جوانه‌زنی و کاهش میانگین زمان جوانه‌زنی را می‌توان به نفوذ نانوذره سریم به داخل پوشش بذر و تسریع جذب آب (Khodakovskaya *et al.*, 2012) و ایجاد تغییرات در بیان برخی ژن‌ها (Tumburu *et al.*, 2015) در مراحل اولیه جوانه‌زنی نسبت داد. در آزمایش حاضر تولید اکسید نیتریک با کاربرد نیتروپرووساید سدیم، موجب تسریع

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوسریم و تنش خشکی بر صفات مورد بررسی در گیاهچه گندم.

Table 3- Mean comparison of interaction effect between nanocerium and drought stress on studied wheat seedling traits

تیمارها Treatments		انرژی جوانه‌زنی (درصد) Germination energy (%)	سرعت جوانه‌زنی (تعداد در روز) Germination rate (1/Day)	طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) Radicle Length (cm)	طول ساقه‌چه (سانتی‌متر) Plumule Length (cm)	فعالیت کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) Catalase activity (Units/mg protein)	میانگین زمان جوانه‌زنی (روز) Mean germination time (Days)	وزن تر ریشه‌چه (میلی‌گرم) Radicle fresh weight (mg)	وزن تر ساقه‌چه (میلی‌گرم) Plumule fresh weight (mg)
0	0	83.99 b	3.48 c	12.17 c	11.92 c	118.12 i	2.31 ab	29.75 c	83.35 b
	500	91.83 a	3.78 ab	12.95 bc	12.76 bc	148.25 gh	2.12 c	31.84 bc	87.82 ab
	1000	95.98 a	3.86 a	14.33 a	13.99 a	155.20 fg	2.17 bc	34.92 a	93.60 a
	2000	93.59 a	3.55 bc	13.52 ab	12.98 b	137.65 h	2.35 a	32.39 b	89.38 ab
- 0.4	0	50.88 e	2.89 d	5.81 fg	5.19 g	170.14 ef	1.78 d	12.91 g	38.61 f
	500	63.76 d	2.91 d	9.18 d	8.76 e	184.90 e	1.77 d	21.85 e	58.36 d
	1000	73.80 c	3.42 c	10.37 d	10.52 d	223.78 d	1.52 e	26.23 c	65.75 c
	2000	50.74 e	2.49 e	7.90 e	7.40 f	162.76 fg	2.09 c	18.44 f	50.31 e
- 0.8	0	39.78 f	1.69 f	4.67 g	4.20 h	260.10 c	1.40 e	10.45 h	27.92
	500	49.21 e	2.29 e	6.10 f	5.81 g	286.90 ab	1.04 f	14.46 g	37.23 f
	1000	53.68 e	2.28 e	7.85 e	6.73 f	299.52 a	1.09 f	16.76 f	45.61 e
	2000	35.71 f	1.77 f	4.98 fg	5.25 g	280.71 b	1.39 e	13.06 g	32.44 fg

بر اساس آزمون LSD، میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند.

In each column means followed by the same letter are not significantly different at the $P \leq 0.05$ level according to LSD test.

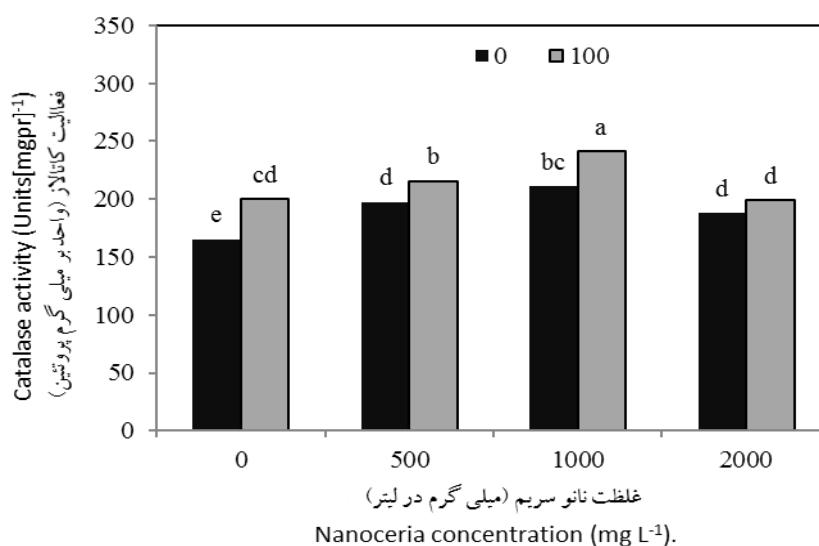
جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل نیتروپروساید سدیم و تنش خشکی بر صفات مورد بررسی در گیاهچه گندم.

Table 4 - Mean comparison of interaction effect of SNP and drought stress on studied wheat seedling traits

تیمارها Treatments		انرژی جوانه‌زنی (%) Germination energy (%)	سرعت جوانه‌زنی (تعداد در روز) Germination rate (1/day)	طول ریشه‌چه (سانتی‌متر) Radicle Length (cm)	طول ساقچه (سانتی‌متر) Plumule length (cm)	فعالیت کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین) Catalase activity (Units[mgpr]⁻¹)	میانگین زمان جوانه‌زنی (روز) Mean germination time (day)	وزن تر ریشه‌چه (میلی‌گرم) Radicle fresh weight (mg)	وزن تر ساقچه (میلی‌گرم) Plumule fresh weight (mg)
تنش خشکی (مگاپاسکال) Drought stress (MPa)	0	90.10 a	3.63 a	13.16 a	12.68 a	136.65 e	2.26 a	31.64 a	86.92 a
	100	92.59 a	3.71 a	13.32 a	13.15 a	142.96 e	2.21 a	32.81 a	90.15 a
نیتروپروساید سدیم (میکرومولار) SNP (μM)	0	53.72 c	2.72 c	7.52 c	7.25 c	170.81 d	1.91 b	18.06 c	47.60 c
	100	65.88 b	3.13 b	9.11 b	8.68 b	199.97 c	1.66 c	21.65 b	58.92 b
	0	39.86 d	1.82 e	4.91 d	4.86 e	264.19 b	1.34 d	12.09 e	31.13 e
	100	49.32 c	2.19 d	6.89 c	6.13 d	299.42 a	1.12 e	15.27 d	40.47 d

بر اساس آزمون LSD، میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر ستون تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد ندارند.

In each column means followed by the same letter are not significantly different at the $P \leq 0.05$ level according to LSD test.



شکل ۱- مقایسه میانگین برهمکنش نانوسریم و نیتروپروساید سدیم بر فعالیت آنزیم کاتالاز.

میانگین‌های دارای حروف مشابه بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری ندارند.

Fig. 1- Mean comparison of interaction effect between nanoceria and SNP on CAT activity. Means followed by the same letter are not significantly different according to LSD test.

خشکی ۰/۸- مگاپاسکال افزایش داد (جدول ۴).
 به نظر می‌رسد اختلال در فرآیند جذب آب طی تنش خشکی موجب کاهش سرعت فرآیندهای متابولیکی سلول مانند تنفس، انتقال مواد ذخیره‌ای، سنتز پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک شده و در نهایت وزن ریشه و ساقه کاهش می‌یابد (Qu *et al.*, 2013). بهبود وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم در حضور نانوذره سریم را می‌توان به نقش احتمالی این نانوذره در تقسیم و طویل شدن سلول‌ها و در نهایت رشد عمومی اندام گیاهی نسبت داد. در همین رابطه افزایش وزن تر ریشه و ساقه در برنج (Liu *et al.*, 2012) و افزایش ۳۳۱ درصدی وزن اندام هوایی جو تحت تاثیر نانوسریم گزارش شده است (Rico *et al.*, 2015). اظهار شده افزایش ضخامت و وزن ریشه، تحت تاثیر تقسیم سلولی و حجیم شدن سلول‌های آوند چوب و آبکش ثانویه رخ داده که وابسته به افزایش فعالیت کامبیوم آوندی بوده و تحت تاثیر نانوذره سریم می‌تواند رخ دهد (Zhang *et al.*, 2015). بهبود وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم تحت تنش خشکی در اثر تیمار با نیتروپروساید سدیم را می‌توان به نقش این ترکیب در فرآیندهای تقسیم سلولی و رشد سلول‌ها نسبت داد (Siddiqui *et al.*, 2011). همچنین بهبود وزن تر ریشه و ساقه گیاهان تحت تنش اکسیداتیو در اثر کاربرد اکسید نیتریک گزارش شده است (Siddiqui *et al.*, 2017).

شاخص بنیه بذر به صورت معنی‌دار تحت تاثیر برهمکنش نانوسریم، نیتروپروساید سدیم و تنش خشکی قرار گرفت (جدول ۱). بر اساس برهمکنش سه گانه عوامل مذکور، در حضور نانوسریم کاربرد نیتروپروساید موجب بهبود شاخص بنیه بذر تحت تنش خشکی شد. کلیه تیمارهای ترکیبی نانوسریم با نیتروپروساید سدیم (به استثنای ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر) شاخص بنیه بذر را افزایش دادند (جدول ۲). به طوری که تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسریم به همراه نیتروپروساید سدیم شاخص ویگور را ۷۵/۵ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال افزایش داد. در خصوص انرژی جوانه‌زنی قابل ذکر است که،

علت کاهش رشد طولی ریشه‌چه و ساقه‌چه در تنش خشکی را می‌توان به تحت تاثیر قرار گرفتن سلول‌های مرستمی اندام مذکور از طریق اختلال در فرآیند تقسیم و طویل شدن سلولی نسبت داد (Muscolo *et al.*, 2014). بر اساس یافته‌های حاصل از تحقیق حاضر، نانوسریم موجب تحریک رشد طولی ریشه‌چه و ساقه‌چه شد. اظهار شده نانوذرات می‌توانند نقشی مشابه هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد مانند سیتوکینین و جیبرلین در گیاه ایفا کرده و موجب تحریک تقسیم و طویل شدن سلولی شوند (Sauret-Güeto *et al.*, 2012). افزایش طول ریشه و ساقه در پیاز (*Allium cepa*) و یونجه (*Medicago sativa*) در اثر کاربرد نانوسریم گزارش شده است (Andersen *et al.*, 2016; Lopez-Moreno *et al.*, 2010). تاثیر مثبت نانوسریم بر طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم تحت تنش خشکی را می‌توان به خاصیت آنتی‌اکسیدانی این نانوذره و کاهش تنش اکسیداتیو حاصل از تنش خشکی نیز نسبت داد (Lopez-Moreno *et al.*, 2010). ریکو و همکاران (Rico *et al.*, 2013) گزارش کردند نانوسریم موجب افزایش طول ریشه و ساقه در گیاهچه برنج شده است. از سوی دیگر اخیرا بهبود طول ریشه و ساقه برخی گیاهان تحت شرایط تنش اکسیداتیو در اثر تیمار با نیتروپروساید سدیم تایید شده است (Siddiqui *et al.*, 2017).

وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه به عنوان دو شاخص مهم در آزمایش‌های جوانه‌زنی تحت تاثیر نانوسریم، نیتروپروساید سدیم و تنش خشکی قرار گرفت (جدول ۱). همچنین اثر متقابل نانوسریم و تنش خشکی و اثر متقابل نیتروپروساید سدیم و خشکی بر وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم معنی‌دار بود (جدول ۱). اگرچه در اغلب غلظت‌های نانوسریم به کار رفته وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه گندم بهبود یافت ولی بیشترین وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه در غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر حاصل گردید (جدول ۳). استفاده از ۱۰۰ میکرومولار نیتروپروساید سدیم نیز وزن تر ریشه‌چه و ساقه‌چه را به ترتیب ۲۰/۸۲ و ۲۳/۰۷ درصد تحت تنش

سه گانه فاکتورهای مذکور بر فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز معنی دار بود (جدول ۱). بیشترین فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در تیمار ترکیبی ۱۰۰۰ میلی گرم نانو سیریم با نیتروپروساید سدیم تحت سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال مشاهده شد (جدول ۲). قابل ذکر است فعالیت آنزیم کاتالاز نیز تحت تاثیر برهمکنش دو گانه نانو سیریم و خشکی، همچنین برهمکنش نیتروپروساید سدیم با خشکی قرار گرفت (جدول ۱). غلظت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانو سیریم فعالیت آنزیم کاتالاز را به ترتیب ۹/۳۵، ۱۳/۱۶ و ۷/۳۴ درصد تحت تنش خشکی ۰/۸- مگاپاسکال افزایش دادند (جدول ۳). نیتروپروساید سدیم علاوه بر افزایش فعالیت کاتالاز گیاهچه‌های گندم تحت تنش خشکی، موجب افزایش معنی دار فعالیت کاتالاز در حضور نانو سیریم شد (شکل ۱).

بر اساس نتایج به دست آمده تنش خشکی موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز گیاهچه گندم شده است. در این بین فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز بیشتر از کاتالاز تحت تاثیر قرار گرفتند. گزارش شده تنش خشکی با افزایش نشت الکترولیت و پراکسیداسیون چربی‌ها، سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (تبدیل کننده O_2^- به H_2O_2) شده و در نهایت موجب افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز در گیاه می‌شود (Rico *et al.*, 2013). برخی محققین افزایش فعالیت آسکوربات پراکسیداز را به افزایش تولید پراکسید هیدروژن در اثر تنش خشکی نسبت داده‌اند (Corral-Diaz *et al.*, 2014).

نتایج آزمایش نشان داد تحت تنش خشکی استفاده از نانوذره سیریم و نیتروپروساید سدیم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز گیاهچه گندم می‌شود. این امر می‌تواند بدلیل اثر نانوذره سیریم بر تحریک سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه

علاوه بر اثرات ساده، برهمکنش‌های دو گانه نانو سیریم با تنش خشکی و نیتروپروساید سدیم با تنش خشکی بر انرژی جوانه زنی معنی دار بودند (جدول ۱). نانو سیریم در تمامی غلظت‌ها (به استثنای ۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر) موجب افزایش انرژی جوانه زنی بذرهای گندم شد (جدول ۳). از سوی دیگر کاربرد نیتروپروساید سدیم به طور معنی داری موجب افزایش انرژی جوانه زنی بذرها تحت سطوح مختلف تنش خشکی گردید (جدول ۴).

همانطور که مشاهده می‌شود (جدول ۲ و ۳) سطوح خشکی مورد مطالعه شاخص بیه بذر و انرژی جوانه زنی را کاهش دادند. به طور کلی شاخص بیه بذر تابعی از درصد جوانه زنی و طول گیاهچه بوده و تنش خشکی از طریق تاثیر قرار دادن آن‌ها بیه بذر را کاهش می‌دهد (Moradi *et al.*, 2015). در آزمایش حاضر شاخص‌های بیه بذر و انرژی جوانه زنی تحت تاثیر نانو سیریم و نیتروپروساید سدیم قرار گرفتند. به طوری که نانو سیریم با افزایش درصد جوانه زنی و طول ریشه چه و ساقه چه، موجب افزایش شاخص بیه بذر و انرژی جوانه زنی بذور گندم تحت تنش خشکی شد. بهبود شاخص‌های بیه بذر و انرژی جوانه زنی در اثر تیمار با اکسید نیتریک را می‌توان به نقش این ماده در افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در فرآیند تجزیه مواد ذخیره‌ای آندوسپرم گندم طی فرآیند جوانه زنی مانند آنزیم‌های آلفا و بتا آمیلاز مرتبط دانست. در این رابطه ژنگ و همکاران (Zheng *et al.*, 2009) گزارش نمودند نیتروپروساید سدیم با افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز و متابولیسم نشاسته می‌تواند سبب بهبود جوانه زنی و استقرار گیاهچه‌های گندم در شرایط تنش شود. این موضوع نشان می‌دهد اکسید نیتریک در تامین انرژی مورد نیاز بذور در طی فرآیند جوانه زنی نقش موثری دارد.

فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، علاوه بر اثرات اصلی نانو سیریم، نیتروپروساید سدیم و خشکی، برهمکنش

میزان محتوی مالون دی آلدئید را به ترتیب ۳۸/۵۷ و ۵۰/۰۲ درصد افزایش دادند (جدول ۲). به نظر می‌رسد تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن در اثر تنش خشکی موجب افزایش پراکسیداسیون چربی و افزایش میزان مالون دی آلدئید گیاهچه گندم شود (Majumdar et al., 2014). در چنین شرایطی، کاربرد همزمان نانوسریم و نیتروپروساید سدیم موجب کاهش معنی‌دار مالون دی آلدئید گیاهچه‌های گندم تحت تنش خشکی شد (جدول ۲). کمترین میزان محتوی مالون دی آلدئید در سطوح مختلف خشکی در تیمار ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسریم و نیتروپروساید سدیم بدست آمد (جدول ۲). بر اساس نتایج حاصله به نظر می‌رسد نانوسریم با بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گندم به ویژه سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز در کاهش اثرات مخرب تنش اکسیداتیو موثر بوده است. قابل ذکر است کاهش محتوی مالون دی آلدئید در برنج در اثر تیمار با نانوسریم گزارش شده است (Liu et al., 2012). همچنین مستندات مبنی بر تاثیر معنی‌دار اکسید نیتریک بر کاهش میزان مالون دی آلدئید در سایر گیاهان تنش دیده ارایه شده است (Tian and Lei, 2006).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده، تنش خشکی موجب کاهش پارامترهای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های گندم شد. در بین سطوح خشکی مورد بررسی، خشکی تا ۰/۸- مگاپاسکال بیشترین تاثیر منفی را بر درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر و رشد گیاهچه گندم داشت. در حضور نانوذره سریم بهبود خصوصیات جوانه‌زنی مانند درصد جوانه‌زنی، انرژی جوانه‌زنی، بنیه بذر و رشد اولیه گیاهچه گندم تحت تنش خشکی قابل ملاحظه بود. در بین غلظت‌های مورد استفاده بیشترین تاثیر در غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر نانوسریم مشاهده شد. نانوذره سریم با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت

باشد. در این رابطه ریکو و همکاران (Rico et al., 2013) اظهار داشتند نانوذره سریم بر سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه برنج موثر بوده و موجب افزایش همزمان فعالیت سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن شده است. افزایش هماهنگ فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و آسکوربات پراکسیداز نقش مهمی در بهبود کارایی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه دارد (Lu et al., 2010). ژائو و همکاران (Zhao et al., 2012) گزارش دادند نانوسریم موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاه ذرت شده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد خاصیت آنتی‌اکسیدانی نانوذره سریم به وجود اکسیژن آزاد در سطح آن مربوط می‌شود. این ویژگی موجب حذف گونه‌های فعال اکسیژن شده و سبب افزایش مقاومت سلولی در برابر تنش اکسیداتیو می‌گردد (Anandkumar et al., 2015). از سوی دیگر، بر تاثیر نیتروپروساید سدیم بر بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی توسط برخی محققین تاکید شده است (Siddiqui et al., 2017). به طوری که تیان و لی (Tian and Lei, 2006) گزارش دادند نیتروپروساید سدیم از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و بهبود روابط آبی در گیاه موجب کاهش اثرات تنش خشکی در گندم می‌شود. به نظر می‌رسد نیتروپروساید سدیم به عنوان یک مولکول پیام رسان می‌تواند فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاهچه‌های گندم تحت تنش خشکی را افزایش داده و در کاهش تنش ثانویه اکسیداتیو موثر واقع شود.

محتوی مالون دی آلدئید (MDA)

اثر متقابل سه گانه نانوسریم، نیتروپروساید سدیم و خشکی در سطح احتمال یک درصد بر محتوی مالون دی آلدئید گیاهچه گندم معنی‌دار شد (جدول ۱). با توجه به نتایج حاضر، سطوح خشکی ۰/۴- و ۰/۸- مگاپاسکال

نیتروپروساید سدیم با بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی به ویژه درصد جوانه‌زنی و بنیه بذر و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاهچه گندم از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و کاهش محتوی مالون دی‌آلدهید می‌تواند در کاهش اثرات مخرب تنش خشکی و تنش اکسیداتیو حاصل از آن موثر باشد.

به ویژه کاتالاز سبب کاهش تنش خشکی در گیاهچه‌های گندم شد. از سوی دیگر نیتروپروساید سدیم در غلظت ۱۰۰ میکرومولار از طریق بهبود قابل توجه درصد جوانه‌زنی، شاخص بنیه بذر و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز موجب کاهش اثرات مخرب تنش خشکی بر جوانه‌زنی بذور گندم شد. باتوجه به نتیجه حاصل از آزمایش به نظر می‌رسد کاربرد ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره سریم و همچنین ۱۰۰ میکرومولار

Reference

منابع

- Abdi, H., M. Bihamta, E. Aziz Ov, and R. Chogan. 2015.** Investigation effect of drought stress level of PEG 6000 on seed germination principle and its relation with drought tolerance index in promising lines and cultivares of bread wheat (*Triticum. aestivum* L.). Iran. J. Field Crops Res. 12: 582–596. (In Persian, with English Abstract)
- Aebi, H. 1984.** Catalase in vitro. Methods Enzymol. 105: 121–126.
- Alessandro, M., P. Filip, F. Guido, Z. Costanza, F. Marta, P. Barbara, V. Massimo, M. Fabiano, M. Rita, and M. Luca. 2016.** Engineered nanomaterials and crops: physiology and growth of barley as affected by nanoscale cerium oxide. Ital. J. Agron. 11: 149–157.
- Amooaghaie, R., F. TabaTabaei, A.M. Ahadi. 2015.** Role of hematin and sodium nitroprusside in regulating *Brassica nigra* seed germination under nano silver and nitrate silver stresses. Eco. Environ. Safe. 113: 259–270.
- Anandkumar, M., C.H. Ramamurthy, C. Thirunavukkarasu, and K. Suresh Babu. 2015.** Influence of age on the free-radical scavenging ability of CeO₂ and Au/CeO₂ nanoparticles. J. Mater. Sci. 50: 2522–2531
- Andersen, C.P., G. King, M. Plocher, M. Storm, L.R. Pokhrel, M.G. Johnson, P.T. Rygielwicz. 2016.** Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. Environ. Toxicol. Chem. 35: 222–2229.
- Bajji, M., J.M. Kinet, and S. Lutts. 2002.** Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (*Chenopodiaceae*). Can. J. Bot. 80: 297–304.
- Bialecka, B., and J. Kępczyński. 2010.** Germination, α -, β -amylase and total dehydrogenase activities of *Amaranthus caudatus* seeds under water stress In the presence of ethephon or gibberellin A₃. Acta Biol. Cracov. Ser. Bot. 52: 7–12.
- Corral-Diaz B., J.R. Peralta-Videa, E. Alvarez-Parrilla, J. Rodrigo-García, P. Osuna-Avila, G.H. Niu, J.A. Hernandez-Viezcás, and J.L. Gardea-Torresdey. 2014.** Cerium oxide nanoparticles alter the antioxidant capacity but do not impact tuber ionome in *Raphanus sativus* (L). Plant Physiol Biochem 84: 277–285.
- Ellis, R.H., and E.H. Roberts. 1981.** The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Sci. Technol. 9: 377–409.
- Giannopolitis, C.N., and S.K. Ries. 1977.** Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. Plant Physiol. 59: 309–314.
- Heath, R.L. and L. Pacher. 1968.** Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Arch. Biochem. Biophys. 125: 189–198.
- Khan, M.A., and I.A. Ungar. 1984.** The effect of salinity stress and temperature on the germination of polymorphic seeds and growth of *atriplex triangularis* willd. Amer. J. Bot. 71: 481–489.

- Khodakovskaya, M.V., K. de Silva, A.S. Biris, E. Dervishi, and H. Villagarcia. 2012.** Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano*. 6: 2128–35.
- Khot, L.R., S. Sankaran, J.M. Maja, R. Ehsani, and E.W. Schuster. 2012.** Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Prot.* 35: 64–70.
- Krasylenko, Y.A., A.I. Yemets, and Y.B. Blume. 2010.** Functional role of nitric oxide in plants. *Russ. J. Plant Physiol.* 57: 451.
- Liu, D., X. Wang, Y. Lin, Z. Chen, H. Xu, and L. Wang. 2012.** The effects of cerium on the growth and some antioxidant metabolisms in rice seedlings. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 19: 3282–3291.
- Liu, H.Y., X. Yu, D.Y. Cui, M.H. Sun, W.N. Sun, Z.C. Tang, S.S. Kwak, and W.A. Su. 2007.** The role of water channel proteins and nitric oxide signaling in rice seed germination. *Cell Res.* 17: 638–649.
- López-Moreno, M.L., G. de La Rosar, J.A. Hernández-Viezcas, J.R. Peralta-Videa, and J.L. Gardea-Torresdey. 2010.** X-ray absorption spectroscopy (XAS) corroboration of the uptake and storage of CeO₂ nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *J. Agric. Food Chem.* 58: 3689–3693.
- Lu, Y., X. Li, M. He, X. Zhao, Y. Liu, Y. Cui, Y. Pan, and H. Tan. 2010.** Seedlings growth and antioxidative enzyme activities in leaves under heavy metal stress differ between two desert plants: A perennial (*Peganum harmala*) and an annual (*Halogeton glomeratus*) grass. *Acta Physiol. Plant.* 32: 583–590.
- Majumdar, S., J.R. Peralta-Videa, S. Bandyopadhyay, H. Castillo-Michel, J.A. Hernandez, S. Sahi, and J.L. Gardea-Torresdey. 2014.** Exposure of cerium oxide nanoparticles to kidney bean shows disturbance in the plant defense mechanisms. *J. Hazard. Mat.* 278: 279–287.
- Mandeh, M., M. Omid, and M. Rahaie. 2012.** In vitro influences of TiO₂ nanoparticles on barley (*Hordeum vulgare* L.) tissue culture. *Biol. Trace Elem. Res.* 150: 376–380.
- Mattiello, A., P. Filip, F. Guido, Z. Costanza, F. Marta, P. Barbara, V. Massimo, M. Fabiano, M. Rita, and M. Luca. 2016.** Engineered nanomaterials and crops: physiology and growth of barley as affected by nanoscale cerium oxide. *Italian J. Agron.* 11: 725.
- Michel, B.E., and M.R. Kaufman. 1983.** The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.* 51: 914–916.
- Mojab, M., Gh.R. Zamani, S.V. Eslami, M. Hosini and S.A. Naseri. 2010.** Study the Effect of Salinity and Drought Stresses Due to NaCl and PEG on Germination Characteristics and Seedling Growth of Jungle rice (*Echinochloa crus-galli* Var:*oryzicola*). *J. Plant Protection.* 24: 108-114. (In Persian, with English Abstract)
- Moradi, A., F. Sharif Zadeh, R. Tavakkol Afshari, and R. Maali Amiri. 2015.** Increasing seed germination efficiency of tall wheat grass (*Agropyron elongatum* (Host.) P. Beauv) at low temperature and drought stress conditions using urea osmopriming. *Iran. J. Seed Res.* 1:19–31. (In Persian, with English Abstract)
- Muscolo, A., M. Sidari, U. Anastasi, C. Santonoceto, and A. Maggio. 2014.** Effect of PEG-induced drought stress on seed germination of four lentil genotypes. *J. Plant Interact.* 9: 354–363.
- Nakano, Y., and K. Asada. 1987.** Purification of ascorbate peroxidase in spinach chloroplast: inactivation in ascorbate-depleted medium and reactivation by monodehydro ascorbate radical. *Plant Cell Physiol.* 28: 131–140.
- Piccinno, F., F. Gottschalk, S. Seeger, and B. Nowack. 2012.** Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials for Europe and the world. *J. Nanopart. Res.* 14: 1109–1120.
- Qu, C., C. Liu, F. Guo, C. Hu, Y. Ze, C. Li, Q. Zhou, and F. Hong. 2013.** Improvement of cerium on photosynthesis of maize seedlings under a combination of potassium deficiency and salt stress. *Biol. Trace Elem. Res.* 155: 104–113.
- Rahemi Karizaki, A., M. Taji, N. Rasaei, and A. Jamali. 2015.** Study the allelopathic effect of the Harmala (*Peganum harmala*) on seed germination and seedling growth characteristics of new wheat cultivar of Gonbad compared to common wheat cultivar in Golestan Province. *Iran. J. Seed Sci. Technol.* 4: 41–49. (In Persian, with English Abstract)
- Rico, C.M., J. Hong, M.I. Morales, L. Zhao, A.C. Barrios, J.Y. Zhang, J.R. Peralta-Videa, and J.L. Gardea-Torresdey. 2013.** Effect of cerium oxide nanoparticles on rice: a study involving the antioxidant defense system and in vivo fluorescence imaging. *Environ. Sci. Technol.* 47: 5635–5642.

- Rico, C.M., J.R. Peralta-Videa, and J.L. Gardea-Torresdey. 2015.** Differential effects of cerium oxide nanoparticles on rice, wheat, and barley roots: A Fourier Transform Infrared (FT-IR) microspectroscopy study. *Appl. Spectrosc.* 69: 287-295.
- Rico, C.M., S.C. Lee, R. Rubenecia, A. Mukherjee, J. Hong, J.R. Peralta-Videa, and J.L. Gardea-Torresdey. 2014.** Cerium oxide nanoparticles impact yield and modify nutritional parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 62: 9669–9675.
- Rossi, L., W. Zhang, L. Lombardini, and X. Ma. 2016.** The impact of cerium oxide nanoparticles on the salt stress responses of *Brassica napus* L. *Environ. Pollut.* 219: 28–36.
- Saeidi, M., M. Abdoli, M. Azhand, and S. Jalali-Honarmand. 2014.** The effect of water deficiency stress and foliar application of indole acetic acid at different stages of grain growth on grain yield and germination traits of produced seeds in bread wheat cultivars. *Iran. J. Seed Sci. Technol.* 3: 173-187. (In Persian, with English Abstract)
- Sajedi, N., H. Madani, and A. Sajedi. 2016.** The effects of seed priming using distillate water and different rates of selenium on germination, seedling growth traits and seed yield of dryland wheat in laboratory and field condition. *Iran. J. Seed Sci. Technol.* 5: 1–14. (In Persian, with English Abstract)
- Sauret-Güeto, S., G. Calder, and N.P. Harberd. 2012.** Transient gibberellin application promotes *Arabidopsis thaliana* hypocotyl cell elongation without maintaining transverse orientation of microtubules on the outer tangential wall of epidermal cells. *Plant J.* 69: 628–639.
- Sharma, P., A.B. Jha, R.S. Dubey, and M. Pessarakli. 2012.** Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J. Bot.* 2012: 1-26.
- Siddiqui, M.H., M.H. Al-Whaibi, and M.O. Basalah. 2011.** Role of nitric oxide in tolerance of plants to abiotic stress. *Protoplasma.* 248: 447–455.
- Siddiqui, M.H., S.A. Alamri., M.Y.Y. Al-Khaishany, M.A. Al-Qutami, H.M. Ali, and Nasir Khan M. 2017.** Sodium nitroprusside and indole acetic acid improve the tolerance of tomato plants to heat stress by protecting against DNA damage, *J. Plant Interact.* 12: 177-186.
- Tian, X., and Y. Lei. 2006.** Nitric oxide treatment alleviates drought stress in wheat seedlings. *Biol. Plant.* 50: 775–778.
- Trujillo-Reyes, J., S. Majumdar, C. Botez, J. Peralta-Videa, and J. Gardea-Torresdey. 2014.** Exposure studies of core-shell Fe/Fe₃O₄ and Cu/CuO NPs to lettuce (*Lactuca sativa*) plants: are they a potential physiological and nutritional hazard? *J. Hazard. Mater.* 267: 255–263.
- Tumburu, L., C.P. Andersen, P.T. Rygiewicz, and J.R. Reichman. 2015.** Phenotypic and genomic responses to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles in *Arabidopsis* germinants. *Environ. Toxicol. Chem.* 34: 70–83.
- Vashisth, A., and S. Nagarajan. 2010.** Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *J. Plant. Physiol.* 167: 149–156
- Wu, M., F. Wang, C. Zhang, Y. Xie, B. Han, J. Huang, and W. Shen. 2013.** Heme oxygenase-1 is involved in nitric oxide- and cGMP-induced *α-Amy2/54* gene expression in GA-treated wheat aleurone layers. *Plant Mol. Biol.* 81: 27–40.
- Zangi, R., and M. Filella. 2012.** Transport routes of metalloids into and out of the cell: a review of the current knowledge. *Chem. Biol. Interact.* 197: 47–57.
- Zhang, W., S.D. Ebbs, C. Musante, J.C. White, C. Gao, and X. Ma. 2015.** Uptake and accumulation of bulk and nanosized cerium oxide particles and ionic cerium by radish (*Raphanus sativus* L.). *J. Agric. Food Chem.* 63: 382–90.
- Zhao, L., B. Peng, J.A. Hernandez-Viezcas, C. Rico, Y. Sun, J.R. Peralta-Videa, X. Tang, G. Niu, X. Jin, A. Varela-Ramirez, J.Y. Zhang, and J.L. Gardea-Torresdey. 2012.** Stress response and tolerance of *Zea mays* to CeO₂ nanoparticles: cross talk among H₂O₂, heat shock protein and lipid peroxidation. *ACS Nano.* 6: 9615–9622.
- Zheng, C.F., D. Jiang, F. Liu, T.B. Dai, W.H. Liu, Q. Jing, and W.X. Cao. 2009.** Exogenous nitric oxide improves seeds germination in wheat against mitochondrial oxidative damage induced by high salinity. *Environ. Exp. Bot.* 67: 222–227.