

بررسی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و محتوای آنتوسیانین گیاهچه دان سیاه (*Guizotia abyssinica*) تحت اثر سه نانو ذره

معظمه اسکندری نسب^۱، محمد رفیعی الحسینی^{۲*}، پرتو روشندل^۳، محمود رضا تدین^۳

چکیده مبسوط

مقدمه: استفاده از فناوری نانو به عنوان رشته‌ای متنوع و کاربردی تقریباً در تمامی زمینه‌های علمی در حال انجام است. کودها و مواد مغذی نانو دارای خواص مؤثری هستند که به تولید گیاهان بر حسب نیاز آن جهت تنظیم رشد گیاه کمک می‌کنند. نانو دی اکسید تیتانیوم خاصیت فتوکاتالستی بالایی دارد و به عنوان یک کاتالیزور بطور عمده در آب، دستگاه‌های الکترونیکی، تجهیزات تبدیل و ذخیره‌ی انرژی و به صورت سوسپانسیون استفاده می‌شوند. منابع دی‌اکسید سیلیسیوم بسیار متنوع است که شامل نانو ذره‌های طبیعی، آنتروپوژنیک و نانوذره‌های مهندسی هستند. اگرچه سیلیسیوم در بسیاری از گیاهان زراعی عنصری ضروری برای رشد محسوب نمی‌شود، اما اثرات سودمندی بر رشد و نمو گیاهان دارد. امروزه نانو تیوب‌های کربنی یکی از مهم‌ترین مواد کاربردی در برنامه‌های صنعتی هستند. این مواد با روش‌های تولید متفاوت و ویژگی‌های خاص می‌توانند نقش مهمی در تولید مواد کامپوزیت، کاربرد در پزشکی، الکترونیک و ذخیره انرژی داشته باشند. گیاه دان سیاه با نام علمی *Goizotia abyssinica* (L.F) Cass. متعلق به خانواده‌ی کاسنی (Asteraceae) است. بذر آن در داروسازی، صنعت غذا، کودسبز و برای خوراک پرندها و تغذیه گاو استفاده می‌شود. لذا هدف از آزمایش حاضر بررسی اثر نوع و غلظت سه نانو ذره بر برخی ویژگی‌های جوانه‌زنی و محتوای آنتوسیانین‌های گیاه دارویی - روغنی دان سیاه بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام شد. تیمارهای نوع نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، دی‌اکسید سیلیسیوم و نانو تیوب کربن به عنوان فاکتور اول و غلظت‌های آن‌ها در چهار سطح صفر، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر به عنوان فاکتور دوم بودند. در این مطالعه صفات درصد، سرعت و متوسط جوانه‌زنی روزانه، شاخص جوانه‌زنی و بنیه گیاهچه، طول، وزن تر و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه، محتوای آنتوسیانین و درصد مقاومت ریشه‌چه اندازه‌گیری شد. یافته‌ها: با افزایش غلظت نانو ذرات میزان درصد، سرعت و متوسط جوانه‌زنی روزانه کاهش یافت. تأثیر مطلوب دی‌اکسید تیتانیوم بر صفت شاخص جوانه‌زنی در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و وزن خشک ریشه‌چه در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به تیمار شاهد حاصل شد. اثر مثبت دی‌اکسید سیلیسیوم بر شاخص جوانه‌زنی و وزن خشک ریشه‌چه در غلظت‌های ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، محتوای آنتوسیانین‌ها و وزن تر و خشک ساقه‌چه در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به شاهد بدست آمد. همچنین، تأثیر مناسب نانو تیوب کربن بر شاخص جوانه‌زنی در غلظت‌های ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، محتوای آنتوسیانین‌ها و وزن خشک ریشه‌چه در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و وزن تر ساقه‌چه در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد تأثیر نانو ذرات در گیاهان علاوه بر اینکه به گیاه، گونه، نوع و غلظت نانو ذرات بستگی دارد، تأثیر این مواد بسته به مرحله رشدی و فیزیولوژی گیاه نیز متفاوت است. به نظر می‌رسد نانو ذرات می‌توانند در برخی غلظت‌ها با اثرات مثبت خود سبب بهبود جذب آب توسط بذر و افزایش رشد گیاهچه شوند. آنتوسیانین‌ها به دلیل فعالیت آنتی‌اکسیدانی که دارند، به هنگام مواجهه شدن گیاه با شرایط تنش تولید می‌شوند. به طور کلی می‌توان بیان داشت که افزایش غلظت نانو ذرات سبب ایجاد و افزایش تنش اکسیداتیو در گیاه گردید. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با بررسی اثرات سوء نانو ذرات بر گیاه، در صورت لزوم، برای افزایش کارایی گیاه از نانو ذرات در غلظت‌های پایین (کمتر از ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: دی‌اکسید تیتانیوم، دی‌اکسید سیلیسیوم، متوسط جوانه‌زنی روزانه، نانو تیوب کربن، وزن خشک ریشه‌چه

جنبه‌های نوآوری:

- ۱- بررسی اثر نوع و غلظت نانو ذرات بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و محتوای آنتوسیانین گیاهچه دان سیاه
- ۲- بررسی اثر متقابل نوع و غلظت نانو ذرات به عنوان عامل پرایمینگ فیزیکی بذر بر جوانه‌زنی بذر گیاه چند منظوره دان سیاه

^۱ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد علوم و تکنولوژی بذر، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۲ استادیار گروه مهندسی زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

^۳ دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد



مقدمه

استفاده از فنآوری نانو به عنوان رشته‌ای متنوع و کاربردی تقریباً در تمامی زمینه‌های علمی در حال انجام است (کوتگودا^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). کودها و مواد مغذی نانو دارای خواص مؤثری هستند که به تولید گیاهان بر حسب نیاز آن جهت تنظیم رشد گیاه کمک می‌کنند (سیدیگوی^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

نانو دی‌اکسید تیتانیوم خاصیت فتوکاتالیستی بالایی دارد و به عنوان یک کاتالیزور بطور عمده در آب، دستگاه‌های الکترونیکی، تجهیزات تبدیل و ذخیره‌ی انرژی و به صورت سوسپانسیون استفاده می‌شوند (کناناکیس و کاتساراکیس^۳، ۲۰۱۴).

تأثیر نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم روی سلول‌های گیاهان هنوز مورد بحث است. در برخی تحقیقات مشخص شده است که نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم اثر سمی دارد (دیمپا^۴ و همکاران، ۲۰۱۲). منابع دی‌اکسید سیلیسیوم بسیار متنوع است که شامل نانو ذره‌های طبیعی، آنتروپوژنیک و نانوذره‌های مهندسی هستند. دی‌اکسید سیلیسیوم یکی از فراوان‌ترین نانو ذره‌های رایج در محیط زیست به خصوص در ناحیه‌ی شهری است (کومار^۵ و همکاران، ۲۰۱۳). هرچند سیلیسیوم در بسیاری از گیاهان زراعی عنصری ضروری برای رشد محسوب نمی‌شود، اما اثرات سودمندی بر رشد و نمو گیاهان دارد (حقیقی و پسرکلی^۶، ۲۰۱۳).

نانو تیوب‌های کربنی یکی از مواد امیدوار کننده در فناوری نانو است و امروزه از مهم‌ترین مواد کاربردی در برنامه‌های صنعتی است. این مواد با روش‌های تولید متفاوت و ویژگی‌های خاص می‌توانند نقش مهمی در تولید مواد کامپوزیت، کاربرد در پزشکی، الکترونیک و ذخیره انرژی داشته باشند (هلاند^۷ و همکاران، ۲۰۰۷). گیاهان در شرایط تنش، مستعد تولید نانو ذرات طبیعی و ضروری، برای ادامه رشد خود می‌شوند (وانگ^۸ و

همکاران، ۲۰۱۰). تأثیر نانو ذرات در سلول‌های گیاهی بستگی به نوع، اندازه و غلظت ذرات دارد (کلت^۹ و همکاران، ۲۰۱۴).

گیاه دان‌سیاه با نام علمی *Goizotia abyssinica* (L.F) Cass.، متعلق به خانواده‌ی کاسنی^{۱۰} است و به طور عمده در هند و اسیویبی کشت می‌شود (بات و مورتی^{۱۱}، ۲۰۰۸). از بذر آن در داروسازی، صنعت غذا، برای خوراک پرنده‌ها و تغذیه گاو استفاده می‌شود، اسید چرب غالب در بذر دان‌سیاه، اسید لینولئیک است که به مقدار ۵۴-۸۵ درصد در بذر این گیاه وجود دارد (آزیل بکلوا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۵). دان سیاه گیاهی چند منظوره است که در گذشته به عنوان غذای پرنده وارد ایران شده است؛ اما اخیراً بدلیل ارزش اقتصادی و امکان صادرات آن به میزان زیادی مورد توجه کشاورزان برخی استان‌ها قرار گرفته است.

تولید و استفاده وسیع از نانو ذرات در تولید محصولات صنعتی و شیمیایی مختلف و تجزیه آنها منجر به آزاد سازی این ذرات به آب، هوا و خاک می‌شود که این امر نگرانی‌هایی را در خصوص انباشته شدن آنها در کره زمین و تأثیر این ذرات بر محیط زیست و اثرات زیستی متضادی که ممکن است روی سلول‌های زنده داشته باشند، به وجود آورده است (نل^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۶). از طرف دیگر اثرات تحریک کننده یا بازدارنده این مواد در پرایمینگ فیزیکی بذر از نظر اکولوژیکی دارای اهمیت خاصی می‌باشد (گوداک^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۱). از آنجائی که تاکنون تأثیر نانو ذرات بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دان‌سیاه مطالعه نشده، لذا هدف از آزمایش حاضر بررسی اثر نوع و غلظت سه نانو ذره بر برخی ویژگی‌های جوانه‌زنی و محتوای آنتوسیانین‌های گیاه دارویی-روغنی دان‌سیاه بود.

⁹ Kalteh

¹⁰ Asteraceae

¹¹ Bhat and Murth

¹² Asilbekova

¹³ Nel

¹⁴ Ghodak

¹ Kottogoda

² Siddiqui

³ Kenanakis and Katsarakis

⁴ Dimkpa

⁵ Kumar

⁶ Haghghi and Pessaraki

⁷ Helland

⁸ Wang

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه تحقیقاتی علوم و تکنولوژی بذری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد در سال ۱۳۹۵ انجام شد. تیمارهای مورد آزمایش شامل سه نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم^۱، دی‌اکسید سیلیسیوم^۲ و نانو تیوب کربنی^۳ (به عنوان فاکتور اول)، هر کدام با چهار غلظت صفر، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر (به عنوان فاکتور دوم) بود. بذره‌های دان‌سیاه از شرکت پاکان بذری اصفهان خریداری شدند. ابتدا بذره‌های پوک، ضعیف و آلوده با استفاده از پنس سترون از بذره‌های سالم جدا گردید. سپس بذره‌های دان‌سیاه با الکل اتیلیک ۷۰ درصد به مدت ۵ ثانیه و سپس با هیپوکلریت سدیم ۱۰ درصد تجاری به مدت ۵ دقیقه ضد عفونی و سه الی چهار مرتبه با آب مقطر شسته شدند. تعداد ۵۰ بذری درون هر پتری پلاستیکی با اندازه ۱۰ سانتی‌متر روی کاغذ صافی واتمن سترون به عنوان بستر کشت قرار گرفت. سپس، محلول‌های تهیه شده از هر سه نانو ذره با غلظت‌های مختلف ذکر شده به صورت جداگانه، به هر پتری اضافه گردید. درب پتری‌ها با پارافیلیم بسته و در ژرمیناتور با دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تناوب نوری ۱۶-۸ ساعت (روشنایی- تاریکی) به مدت هفت روز قرار داده شد.

معیار جوانه‌زنی بذرها در شرایط آزمایشگاهی، خروج ریشه‌چه حداقل به طول ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پس از مدت ۷ روز، جوانه‌زنی متوقف و برخی از شاخه‌های جوانه‌زنی و محتوی آنتوسیانین ریشه گیاهچه با استفاده از فرمول‌های جدول ۱، برخی شاخه‌های مورفولوژیکی گیاهچه نظیر وزن تر و خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه با استفاده از ترازو دیجیتال (دقت ۰/۰۰۰۱ گرم) بر حسب میلی‌گرم و طول ریشه‌چه و ساقه‌چه با استفاده از کولیس بر حسب سانتی‌متر، اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری محتوی آنتوسیانین‌ها ابتدا ۲۵۰ میلی‌گرم از بافت تازه گیاه با ۵ میلی‌لیتر از محلول

حاوی اتانول، آب و اسید کلریدریک هر کدام به ترتیب به نسبت ۵۰، ۴۹/۱ و ۰/۹ به صورت مخلوط یکنواخت ساییده شد و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد با دور ۸۵۰۰g سانتریفیوژ گردید. سپس از فاز شفاف (صورتی رنگ) قسمت بالای عصاره برای قرائت با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۵۲۵ و ۷۰۰ نانومتر استفاده و محتوی آنتوسیانین اندازه‌گیری شد (کالبات^۴ و همکاران، ۱۹۹۰).

$$ATH(\text{mmol g}^{-1}\text{FW}) = (A_{525} - A_{700}) \times V / \text{dFW}$$

A_{525} و A_{700} : جذب در طول موج ۵۲۵ و ۷۰۰ نانومتر، V: حجم نمونه استخراج شده (لیتر)، ϵ : ضریب خاموشی سیانیدین-۳-گلوکوزید در طول موج ۵۲۵ نانومتر، d: عرض کوت (سانتی‌متر)، FW: وزن نمونه تازه (گرم) داده‌های حاصل از آزمایش بوسیله نرم‌افزار SAS (9.4) و MSTAT-C مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها با روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که از بین تیمارهای نوع، غلظت نانو ذرات و برهمکنش آن‌ها تنها تیمار غلظت‌های مختلف نانو ذرات بر صفت درصد جوانه‌زنی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). مقایسه میانگین غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین درصد جوانه‌زنی در تیمار شاهد و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین میزان آن در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر نانو ذرات به دست آمد (جدول ۳). این نتیجه نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانو ذرات میزان درصد جوانه‌زنی بذرها کاهش یافته است. با افزایش غلظت نانو ذرات، جذب آن‌ها توسط پوسته بذری افزایش یافته و در بذری ایجاد سمیت می‌شود که به دنبال آن با کاهش جذب آب، جوانه‌زنی نیز کاهش می‌یابد.

¹ TiO₂

² SiO₂

³ Carbon nanotubes

⁴ Callebaut

جدول ۱- روابط محاسباتی شاخص‌های جوانه‌زنی و محتوای آنتوسیانین‌های ریشه‌چه دان‌سیاه

Table 1. Equations of germination indices and radicle anthocyanins content of Niger

شاخص (Index)	رابطه (Equation)	منبع (Reference)
درصد جوانه‌زنی Germination percentage	$GP = \left(\frac{GN}{SN}\right) \times 100$	فیضی ^۱ و همکاران (۲۰۱۱)
سرعت جوانه‌زنی Germination rate	$GR = \sum \left(\frac{Gi}{i}\right)$	آل کایسی ^۲ و همکاران (۲۰۱۲)
متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean of daily germination	$MDG = \left(\frac{FGP}{D}\right)$	هانتر ^۳ و همکاران (۱۹۸۴)
شاخص جوانه‌زنی Germination index	$GI = (\sum Ti \times Ni) / S$	اسکات ^۴ و همکاران (۱۹۸۴)
شاخص بنیه گیاهچه Seedling vigor index	$Vigor\ index = (PL + RL) \times GP$	آگراوال ^۵ (۲۰۰۳)
درصد مقاومت ریشه‌چه Percentage of radicle resistance	$RTI2 = \frac{RL(Treatment)}{RL(Control)} \times 100$	راسکار و لاوار ^۶ (۲۰۱۳)

GN: تعداد کل بذرهای جوانه زده، SN: تعداد کل بذرهای تست شده، Gi: تعداد بذرهای جوانه زده در روز i، i: تعداد روز پس از کاشت، FGP: درصد جوانه‌زنی نهایی، D: طول دوره آزمایش، Ti: زمان شمارش پس از کاشت (روز)، Ni: تعداد بذرهای جوانه زده در هر روز شمارش، S: کل بذرهای کاشته شده، PL: طول ساقه‌چه (سانتی‌متر)، RL: طول ریشه‌چه (سانتی‌متر)

GN, Total number of germinated seeds, SN, Number of tested seeds, Gi, number of germinated seeds in day i, i, Number of days after sowing, FGP, Final germination percentage, D, Test period, Ti, Counting time after planting (day), Ni, Number of germinated seeds per day of counting, S, Total number of sowed seeds, PL, Pedicel length (cm), RL, Radicle length (cm)

جدول ۲- تجزیه واریانس شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دان‌سیاه تحت تیمارهای آزمایشی

Table 2. Variance analysis of germination indices of Niger seed under experimental treatments

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)		
		درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی Germination rate	متوسط جوانه‌زنی روزانه Mean of daily germination
نوع نانو ذره Nanoparticle type (N)	2	2.3 ^{ns}	0.2 ^{ns}	0.05 ^{ns}
غلظت Concentration (C)	3	11.4 ^{**}	7.9 [*]	0.02 ^{**}
نوع × غلظت N × C	6	0.8 ^{ns}	0.9 ^{ns}	0.02 ^{ns}
خطا Error	24	1.0	2.5	0.02
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	1.0	3.7	1.0

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

ns* and ** show not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

⁴ Scott⁵ Agrawal⁶ Raskar and Laware¹ Feizi² AL-Kaisi³ Hunter

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای غلظت‌های نانو ذرات بر برخی شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دان‌سیاه

Table 3. Mean comparison of the effect of concentration of nanoparticles on some germination indices of Niger seed

غلظت نانو ذرات (میلی گرم در لیتر) concentration (mg/l)	درصد جوانه‌زنی Germination percentage	سرعت جوانه‌زنی (بذر/روز) Germination rate (1/day)	متوسط جوانه‌زنی روزانه (درصد/روز) Mean of daily germination (Percentage/day)
0	100.0 ^a	44.3 ^a	14.3 ^a
10	99.8 ^a	44.3 ^a	14.2 ^a
30	98.6 ^b	43.2 ^{ab}	14.1 ^b
60	97.5 ^c	42.3 ^b	13.9 ^c

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means having at least one common letter are not significantly different at 5 % probability level.

میانگین غلظت نانو ذرات بر سرعت جوانه‌زنی نشان داد که بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی در تیمار شاهد و غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین سرعت جوانه‌زنی در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد (جدول ۳). افزایش غلظت نانو ذرات، سبب کاهش سرعت جوانه‌زنی شد و این بدان معنی است که با افزایش غلظت، اثر سمیت در گیاهچه ایجاد شده که سبب کاهش سرعت جوانه‌زنی نسبت به تیمار شاهد شده است. نتایج نشان داد تیمارهایی که سبب افزایش درصد جوانه‌زنی شده‌اند، سرعت جوانه‌زنی بیش‌تری را هم داشته‌اند. بیش‌ترین میزان درصد و سرعت جوانه‌زنی در پایین‌ترین غلظت و کم‌ترین میزان آن‌ها در بالاترین غلظت نانو ذرات مشاهده شد (جدول ۳). نتایج پژوهش عظیمی^۳ و همکاران (۲۰۱۴) بیانگر تأثیر منفی نانو دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت بالا بر صفات جوانه‌زنی گیاهچه علف چمنی بود. کاربرد غلظت ۸۰ پی‌پی‌ام نانو دی‌اکسید تیتانیوم، اثرات سمیت را در گیاهچه علف چمنی نشان داد و بیش‌ترین سرعت جوانه‌زنی در غلظت‌های متوسط ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد.

متوسط درصد جوانه‌زنی روزانه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر نوع نانو ذرات و برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات بر متوسط جوانه‌زنی روزانه بذرهای معنی‌دار نشد. این صفت نسبت به تیمار غلظت نانو ذرات تأثیر معنی‌داری را در سطح احتمال ۱

سیدیگوی و ال واییبی^۱ (۲۰۱۴) با بررسی اثر کاربرد نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت‌های صفر، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ گرم بر لیتر بر جوانه‌زنی بذر برنج بیان داشتند که این نانو ذره در غلظت ۸ گرم بر لیتر سبب افزایش معنی‌دار صفات درصد جوانه‌زنی، شاخص جوانه‌زنی، بنیه بذر و وزن تر و خشک گیاهچه گردیده است. ایشان افزایش جوانه‌زنی بذر را ناشی از جذب و مصرف نانو دی‌اکسید سیلیسیوم توسط بذر دانستند. نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم ممکن است شبیه به ذرات سیلیس عمل کنند که در فرآیند جوانه‌زنی نقش دارند. نتایج مشابه در دیگر مطالعات نیز گزارش شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهشی، تیواری^۲ و همکاران (۲۰۱۴) بیان داشتند که نانو تیوب‌های کربن در غلظت بالای ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، به دلیل ممانعت از ورود آب اطراف سلول به درون آن، با ممانعت از فعالیت مویرگی انتقال آب، سبب ایجاد سمیت در گیاه می‌شود.

سرعت جوانه‌زنی

اگرچه تجزیه واریانس داده‌های صفت سرعت جوانه‌زنی نشان داد که اثر نوع نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات بر این صفت معنی‌دار نشد، تیمار غلظت‌های مختلف نانو ذرات بر صفت مذکور در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه

¹ Siddique and Al-Whaibi

² Tiwari

³ Azimi

۸۰ میلی‌گرم در لیتر) بر رفتار جوانه‌زنی گیاه دارویی مرو تلخ، اثر معنی‌دار نانو ذره مذکور بر شاخص جوانه‌زنی را نشان دادند. همچنین، بیش‌ترین میزان این صفت در نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم و در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد.

طول ریشه‌چه

نتایج تجزیه واریانس صفت طول ریشه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات در سطح احتمال ۱ درصد و اثر تیمار غلظت‌های مختلف نانو ذرات در سطح احتمال ۵ درصد بر این صفت معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین طول ریشه‌چه در نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم و در غلظت‌های ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین آن در تیمار نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم و غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده گردید (جدول ۵). خوداکواسکایا^۳ و همکاران (۲۰۰۹) در پژوهشی نشان دادند که نانو دی‌اکسید تیتانیوم با افزایش جذب توسط پوسته ضخیم بذر گوجه‌فرنگی و افزایش جذب آب اطراف بذر، سبب بهبود جوانه‌زنی و رشد ریشه‌چه شد. جذب آب در جوانه‌زنی بذر مهم است چرا که بذرهای بالغ نسبتاً خشک هستند و نیاز به مقدار قابل توجهی از آب برای شروع متابولیسم سلولی و رشد بذر دارند. تعیین مقدار رطوبت بذر و نانو مواد درون بذرهای این فرضیه را پشتیبانی می‌کند؛ با این حال، مکانیزم نفوذ خاص از طریق پوسته بذر و تقویت جذب آب توسط مواد نانو گزارش نشده است (کرابری^۴، ۱۹۹۸). گزارش شده است که نانو سیلیسیوم سبب افزایش قطر ریشه و محتوی لیگنینی در جوانه کلزا شد. در نتیجه افزایش قطر، طول ریشه‌چه کاهش و افزایش محتوی لیگنینی (که خاصیت سختی و چوبی شدن را می‌دهد) وزن ریشه‌چه افزایش می‌یابد (لوکاکوا^۵ و همکاران، ۲۰۱۳).

درصد نشان داد (جدول ۲). مقایسه میانگین متوسط جوانه‌زنی روزانه نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین متوسط جوانه‌زنی روزانه به ترتیب در غلظت ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد (جدول ۳). مطالعه اثر غلظت‌های مختلف نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم (صفر، ۵، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر خصوصیات جوانه‌زنی بذر گونه‌ای گون، نشان داد که اثر تیمار غلظت‌های متفاوت نانو ذرات بر درصد جوانه‌زنی و متوسط جوانه‌زنی روزانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. در این مطالعه، غلظت‌های بالای نانو ذرات تأثیر مثبتی بر بهبود جوانه‌زنی نداشت (عظیمی و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش حاضر نیز افزایش غلظت نانو ذرات از ۱۰ به ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، سبب کاهش متوسط درصد جوانه‌زنی روزانه گردید. با توجه به اینکه اثر تیمار نوع نانو ذرات بر درصد و سرعت جوانه‌زنی و متوسط جوانه‌زنی روزانه معنی‌دار نشد، این صفات نسبت به نوع نانو ذرات واکنشی نشان ندادند. همچنین عدم معنی‌داری برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات بر درصد، سرعت و متوسط جوانه‌زنی روزانه نشان داد که تأثیر نوع نانو ذرات در غلظت‌های مختلف بر صفات مذکور یکسان است (جدول ۲).

شاخص جوانه‌زنی

اثر غلظت نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذره بر شاخص جوانه‌زنی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین شاخص جوانه‌زنی در نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم و در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین آن در تیمار با نانو ذره دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و نانو تیوب کربن در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد (جدول ۵). نتایج پژوهشی نشان داد که نانو سیلیسیوم و تیتانیوم سبب بهبود شاخص‌های جوانه‌زنی شدند (لو^۱ و همکاران، ۲۰۰۲). حاتمی^۲ و همکاران (۲۰۱۴) با انجام پژوهشی مبنی بر بررسی تأثیر نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم (در غلظت‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و

³ Khodakovskaya

⁴ Crabtree

⁵ Lukacova

¹ Lu

² Hatami

جدول ۴- تجزیه واریانس شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دان سیاه تحت تیمارهای آزمایشی

Table 4. Variance analysis of germination indices of Niger seed under experimental treatments

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean square)				
		شاخص جوانه‌زنی Germination index	طول ریشه‌چه Radicle length	طول ساقچه Plumule length	شاخص بنیه Vigor index	مقاومت ریشه‌چه Radicle resistance
نوع نانو ذره Nanoparticle type (N)	2	0.0006 ^{ns}	1.7 ^{**}	1.3 ^{**}	2.9 ^{**}	549.3 ^{**}
غلظت Concentration (C)	3	0.003 ^{**}	0.3 [*]	0.1 ^{**}	2.9 ^{**}	100.1 [*]
نوع × غلظت N × C	6	0.005 ^{**}	0.4 ^{**}	0.5 ^{**}	1.2 ^{**}	154.3 ^{**}
خطا Error	24	0.0005	0.1	0.1	0.2	29.4
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	1.8	6.1	8.0	5.3	5.7

ns, * و ** به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

ns, * and ** show not significant, significant at 5% and 1% probability level, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر دان سیاه

Table 5. Mean comparison of the interaction effect of type and concentration of nanoparticles on some germination indices of Niger seed

نانو ذره Nanoparticle	غلظت Concentration (mg/l)	شاخص جوانه‌زنی Germination index	طول ریشه‌چه Radicle length (cm)	طول ساقچه Plumule length (cm)	شاخص بنیه Vigor index	مقاومت ریشه‌چه Radicle resistance (%)
دی‌اکسید تیتانیوم TiO ₂	0	1.29 ^e	5.6 ^{ab}	4.7 ^a	10.3 ^a	100.0 ^{ab}
	10	1.31 ^{de}	5.9 ^a	3.6 ^{cd}	9.5 ^{ab}	105.3 ^a
	30	1.39 ^a	5.8 ^{ab}	4.4 ^{ab}	10.1 ^a	102.0 ^{ab}
	60	1.33 ^{bcd}	5.9 ^a	4.3 ^{ab}	10.0 ^a	104.9 ^a
دی‌اکسید سیلیسیوم SiO ₂	0	1.28 ^e	5.6 ^{ab}	4.7 ^a	10.3 ^a	100.0 ^{ab}
	10	1.34 ^{bcd}	5.3 ^{bc}	4.7 ^a	10.0 ^a	93.7 ^{bc}
	30	1.29 ^e	4.6 ^d	4.5 ^a	9.0 ^{bc}	82.1 ^d
	60	1.37 ^{ab}	4.9 ^{cd}	4.5 ^a	9.1 ^{bc}	87.2 ^{cd}
نانو تیوب کربن CNT	0	1.27 ^e	5.6 ^{ab}	4.7 ^a	10.3 ^a	100.0 ^{ab}
	10	1.36 ^{abc}	4.8 ^{cd}	3.9 ^{bc}	8.6 ^c	85.0 ^{cd}
	30	1.33 ^{cd}	5.5 ^{ab}	4.1 ^{abc}	9.5 ^{ab}	98.3 ^{ab}
	60	1.29 ^e	4.7 ^d	3.1 ^d	7.7 ^d	84.5 ^d

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means having at least one common letter are not significantly different at 5% probability level.

طول ساقچه

تجزیه واریانس حاصل از داده‌های طول ساقچه نشان داد که اثر تیمار نوع نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد و اثر تیمار غلظت‌های نانو ذرات بر آن در سطح

مقایسه احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). با توجه به نتایج مقایسه میانگین برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات، بیش‌ترین طول ساقچه در تیمار شاهد و نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین میزان آن در نانو تیوب کربن

و در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد (جدول ۵).

در پژوهشی با بررسی اثر نانو سیلیسیوم بر جوانه‌زنی گیاه یولاف، نتایج نشان داد که نانو سیلیسیوم سبب افزایش معنی‌دار طول ساقه‌چه در غلظت ۱/۵ میلی‌مولار گردید (روحی‌زاده^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). افزایش مقدار سیلیسیوم سبب جذب و رسوب بیش‌تر این عنصر در دیواره سلولی و تشکیل لایه سلولز-سیلیسیوم می‌شود. در نتیجه پیوند آن با کلسیم و پکتین دیواره سلولی، سبب استحکام دیواره و طول شدن سلول در مراحل اولیه رشد می‌گردد. به دنبال آن اندازه سلول و انعطاف پذیری گیاه کاهش می‌یابد و سبب کاهش طول می‌شود (لیانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۷). لذا کاهش طول ساقه‌چه نتیجه افزایش غلظت نانو ذره سیلیسیوم بوده که سبب جذب بیش‌تر این نانو ذره می‌شود. با کاهش غلظت این نانو ذره میزان جذب آن کاهش می‌یابد و به دنبال آن اثرات منفی ذکر شده کاهش و یا متوقف و طول ساقه‌چه افزایش می‌یابد.

بررسی اثر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر کلزا نشان داد که این نانو ذره در غلظت‌های ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، سبب افزایش طول ریشه‌چه و ساقه‌چه گردید (محمودزاده^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). در پژوهشی، عباسی^۴ و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی اثر نانو سیلیس و نانو نقره بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر آویشن، بیان داشتند که بین تیمار شاهد، ۲۰ درصد و ۶۰ درصد نانو ذرات ذکر شده، نانو سیلیس در غلظت ۶۰ درصد و نانو نقره در غلظت ۲۰ درصد بیش‌ترین تأثیر معنی‌دار را بر افزایش صفات درصد و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن تر و خشک گیاهچه و شاخص بنیه گیاهچه داشتند.

شاخص بنیه

نتایج تجزیه واریانس شاخص بنیه گیاهچه نشان داد که اثر تیمار نوع، غلظت‌های نانو ذرات و برهمکنش بین آن‌ها بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار

بود (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین شاخص بنیه در تیمار شاهد و کم‌ترین آن در نانو تیوب کربن در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد (جدول ۵). بنیه گیاهچه یکی از مهم‌ترین صفاتی است که افزایش در میزان آن نشانه بارز افزایش کیفیت و قدرت جوانه‌زنی بذر است. همانطور که مشخص است این صفت از حاصل‌ضرب طول گیاهچه در درصد جوانه‌زنی به دست می‌آید و تیمارهایی که سبب افزایش طول گیاهچه و درصد جوانه‌زنی می‌شوند، بهبود بنیه یا قدرت جوانه‌زنی را نیز به دنبال دارند. ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی بررسی تأثیر نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر جوانه‌زنی بذر اسفناج بیان کردند که تیمار نانو ذره مذکور سبب افزایش معنی‌دار شاخص جوانه‌زنی و شاخص بنیه گیاهچه شد. حاتمی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی اثر نانو دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در لیتر بر بنیه گیاهچه گیاه دارویی مرو تلخ نشان دادند که نانو ذره مذکور اثر معنی‌داری را بر این صفت داشت و بیش‌ترین میزان این صفت در این نانو ذره در غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد.

درصد مقاومت ریشه‌چه

تجزیه واریانس حاصل از صفت درصد مقاومت ریشه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات بر صفت مذکور در سطح احتمال ۱ درصد و اثر تیمار غلظت نانو ذرات بر آن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین درصد مقاومت ریشه‌چه در تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و نانو تیوب کربن در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد که این تیمارها با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری نداشتند. کم‌ترین میزان صفت مذکور در تیمار دی‌اکسید سیلیسیوم و نانو تیوب کربن به ترتیب در غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد (جدول ۴).

¹ Roohizadeh

² Liang

³ Mahmoodzadeh

⁴ Abbasi

⁵ Zhang

آنتوسیانین‌ها گروهی از ترکیبات فنولی با توزیع گسترده در گیاهان می‌باشند. به طور معمول در گل‌ها، میوه‌ها و قسمت‌های رویشی گیاهان دیده می‌شوند و مسئول تغییر رنگ از قرمز به آبی می‌باشند. آنتوسیانین‌ها گلیکوزید و آسیل گلیکوزیدهایی از سیانیدین‌ها هستند و نقش مهمی در فیزیولوژی گیاهان دارند. همچنین، حاوی رنگدانه‌هایی برای جذب حشرات گرده‌افشان هستند. آنتوسیانین‌ها رنگدانه‌های گل و گیاهان را از نور بیش از حد محافظت می‌کنند که فعالیت آن‌ها به عنوان رنگدانه محافظتی به صورت سایه برگ برای سلول‌های مزوفیل برگ می‌باشد. گیاهان وقتی در شرایط تنش مانند کمبود فسفات، سرد شدن هوا یا محتوی نمک زیاد قرار می‌گیرند، برگ‌های آن‌ها به رنگ قرمز در می‌آید. این قرمزی به دلیل تجمع آنتوسیانین‌ها است که به هنگام تنفس نوری مصرف NADPH و ATP توسط گیاه کم می‌شود. در واقع در شرایط تنش میزان آنتوسیانین‌ها افزایش یافته و با محافظت از سلول‌های مزوفیل، فعالیت نوری گیاه را کاهش می‌دهد و مانع از جذب انرژی بیش از حد و انعطاف‌پذیری الکترون‌های زنجیره انتقال الکترون در فرآیند فتوسنتز می‌گردد (هلت و پایچول^۵، ۲۰۱۱). بدین گونه آنتوسیانین‌ها از اکسیداسیون نوری سلول‌ها و بافت‌ها توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن جلوگیری می‌کنند. در پژوهش حاضر با افزایش غلظت هر سه نانو ذره میزان آنتوسیانین‌ها نیز افزایش یافته است و این بدان معنا است که نانو ذرات در غلظت‌های بالا (۶۰ میلی‌گرم بر لیتر)، سبب ایجاد تنش برای گیاهچه شده و در شرایط تنش به دلیل تنفس نوری، تجمع بیش از حد نور و انعطاف‌پذیری الکترون‌ها در جذب نور، رادیکال‌های آزاد اکسیژن و در نتیجه میزان آنتوسیانین‌ها برای ایفای نقش آنتی‌اکسیدانی خود افزایش می‌یابد.

نتایج پژوهشی نشان داد که نانو تیوب‌های کربنی چند جداره سبب تجمع آلودگی و یا دفع آن‌ها در گیاهان زراعی شدند. این نانو ذرات می‌توانند به عنوان ناقل آلاینده، آلودگی را به قسمت‌های خوراکی محصولات انتقال دهند و با نفوذ به داخل ریشه گیاهان خردل به اندام‌های بالایی، تحت نیروی جریان تعرق منتقل شوند (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). در پژوهشی، تدین^۲ و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی اثر نانو تیوب کربن در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بر شاخص‌های جوانه‌زنی گیاه باقلا، نشان دادند که نانو تیوب کربن در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین کاهش معنی‌دار را بر درصد مقاومت ریشه‌چه داشت. در پژوهشی دیگر بیان شد که نانو تیوب‌های کربن می‌توانند موجب سمیت در گیاهان شوند (خداکاو سکا باو همکاران، ۲۰۰۹). در پژوهش حاضر نیز، با افزایش غلظت نانو تیوب کربن، درصد مقاومت ریشه‌چه کاهش یافت. به دلیل اینکه ریشه اولین اندامی است که در تماس با فلزات سنگین است (نوروزی^۳، ۲۰۱۳). احتمالاً افزایش غلظت نانو ذره مذکور، سبب افزایش جذب آن و ایجاد سمیت شده است. همچنین، یکی از اثرات غیر مستقیم فلزات سنگین بر گیاه، اختلال در جذب مواد معدنی و در نتیجه مهار رشد گیاه می‌باشد (ماکسیمیک^۴، ۲۰۰۷).

محتوای آنتوسیانین‌ها

تجزیه واریانس داده‌های حاصل از محتوی آنتوسیانین ریشه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع، غلظت‌های نانو ذرات و برهمکنش بین آن‌ها بر این صفت، در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین محتوی آنتوسیانین‌ها در تیمار با نانو تیوب کربن و نانو دی‌اکسید سیلیسیم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین آن در تیمار شاهد مشاهده شد (جدول ۷).

¹ Chen

² Tadayon

³ Noroozi

⁴ Maksymiec

⁵ Heldt and Piechull

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های جوانه‌زنی بذر و محتوای آنتوسیانین ریشه‌چه دان‌سیاه تحت تیمارهای آزمایشی

Table 6. Variance analysis of germination indices of Niger seed and content of radicle Anthocyanin under experimental treatments

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean square)				
		محتوی آنتوسیانین Anthocyanin content	وزن تر ساقه‌چه Plumule fresh weight	وزن خشک ساقه‌چه Plumule dry weight	وزن تر ریشه‌چه Radicle fresh weight	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight
نوع نانو ذره Nanoparticle type (N)	2	15.9**	1763.1**	75.14**	490.4*	9.8*
غلظت Concentration (C)	3	44.1**	1801.6**	43.8**	2150.1**	21.8**
نوع × غلظت N × C	6	3.9**	7513.1**	152.6**	786.4**	20.2**
خطا Error	24	0.1	165.2	3.4	94.9	3.5
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	4.9	2.5	1.2	5.0	3.4

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد را نشان می‌دهند.
ns, * and ** show not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات بر شاخص‌های جوانه‌زنی و محتوای آنتوسیانین ریشه‌چه دان‌سیاه

Table 7. Mean comparison of the interaction effect of type and concentration of nanoparticles on germination indices and content of radicle Anthocyanin of Niger

نانو ذره Nanoparticle	غلظت Concentration (mg/l)	محتوی آنتوسیانین Anthocyanin content (mmol g ⁻¹)	وزن تر ساقه‌چه Plumule fresh weight (mg)	وزن خشک ساقه‌چه Plumule dry weight (mg)	وزن تر ریشه‌چه Radicle Fresh Weight (mg)	وزن خشک ریشه‌چه Radicle dry weight (mg)
دی‌اکسید تیتانیوم TiO ₂	0	2.4 ^f	530.0 ^c	154.7 ^b	208.3 ^a	54.0 ^{bc}
	10	2.7 ^f	520.0 ^c	156.0 ^b	211.3 ^a	56.3 ^{ab}
	30	3.8 ^e	476.7 ^d	148.4 ^c	170.0 ^d	51.5 ^{cd}
	60	7.0 ^c	481.7 ^d	144.6 ^{de}	190.0 ^{bc}	54.0 ^{bc}
دی‌اکسید سیلیسیوم SiO ₂	0	2.4 ^f	530.0 ^c	154.6 ^b	208.3 ^a	54.0 ^{bc}
	10	3.9 ^e	490.3 ^d	155.2 ^b	175.0 ^{cd}	56.3 ^{ab}
	30	4.3 ^d	483.3 ^d	146.7 ^{cd}	153.3 ^e	52.6 ^c
	60	8.3 ^a	560.0 ^b	162.7 ^a	210.0 ^a	49.2 ^a
نانوتیوب کربن CNT	0	2.4 ^f	529.0 ^c	154.7 ^b	208.3 ^a	54.0 ^{bc}
	10	6.9 ^c	490.0 ^d	147.1 ^{cd}	208.3 ^a	49.1 ^d
	30	7.5 ^b	609.3 ^a	156.6 ^b	184.7 ^{bcd}	54.0 ^{bc}
	60	8.3 ^a	475.7 ^d	142.2 ^c	207.3 ^a	57.1 ^{ab}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشابه در هر ستون بر اساس آزمون LSD از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means having at least one common letter are not significantly different at 5% probability level.

وزن تر ساقه‌چه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس وزن تر ساقه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع، غلظت‌های نانو ذرات و برهمکنش بین آن‌ها بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین حاصل از داده‌های برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین میزان وزن تر ساقه‌چه در نانو تیوب کربن و در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و کم‌ترین آن در نانو دی‌اکسید تیتانیوم و در غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد، اگر چه این تیمار با تیمار نانو دی‌اکسید سیلیسیوم و در غلظت ۱۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و نانو تیوب کربن در غلظت ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر هیچگونه تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۷).

در پژوهشی با بررسی تأثیر نانو اکسید روی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر لوبیا چیتی، نتایج نمایانگر اثر معنی‌دار این نانو ذره در غلظت‌های مختلف بر وزن تر و خشک ساقه‌چه بود (زو^۱ و همکاران، ۲۰۰۸). رحیمی^۲ (۲۰۱۵) با انجام آزمایشی مبتنی بر بررسی اثرات نانو دی‌اکسید تیتانیوم، نانو دی‌اکسید سیلیسیوم و نانو تیوب کربن بر دو رقم جو لخت و پوشینه‌دار، نشان دادند که برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات بر صفت وزن تر و خشک ساقه‌چه برای تمام ارقام جو (بهمن، ماکویی، نصرت، لوت و D₅) در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. همچنین ایشان بیان داشتند که بیش‌ترین وزن تر ساقه‌چه مربوط به تیمار نانو تیوب کربن در غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و در رقم نصرت حاصل گردید. در پژوهشی نشان دادند که نانو تیوب کربن نسبت به شاهد سبب افزایش وزن تر ساقه‌چه گیاه باقلا گردیده است (تدین و همکاران، ۲۰۱۳).

وزن خشک ساقه‌چه

تجزیه واریانس وزن خشک ساقه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع، غلظت‌های نانو ذرات و برهمکنش بین آن‌ها بر این صفت در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین وزن خشک

ساقه‌چه به ترتیب در تیمار با نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و در نانو تیوب کربن در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل گردید (جدول ۷). ساریاراپرابها^۳ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی اثر نانو دی‌اکسید سیلیسیوم بر ذرت، بیان داشتند که نانو دی‌اکسید سیلیسیوم تأثیر معنی‌داری بر افزایش وزن خشک ذرت داشت. عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی کاربرد نانو دی‌اکسید سیلیسیوم بر جوانه‌زنی بذر علف چمنی، مشاهده کردند که به طور معنی‌داری جوانه‌زنی بذر و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه در غلظت ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به شاهد افزایش یافت. در پژوهشی با بررسی اثر نانو ذرات سیلیس و سیلیس بر جوانه‌زنی گیاه شنبلله، نتایج نشان داد که نانو ذرات سیلیس سبب افزایش غلظت سیلیس و افزایش ضخامت دیواره سلولی آوند چوبی در ساقه شد (نظرعلیان^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین در مطالعه‌ای که توسط ژو و گانگ^۵ (۲۰۱۴) انجام شد، نشان داده شد که سیلیس سبب افزایش رشد گیاه می‌گردد. از این نتیجه استنباط می‌شود که افزایش ضخامت دیواره سلولی در ساقه سبب افزایش وزن ساقه‌چه می‌گردد.

وزن تر ریشه‌چه

نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس صفت وزن تر ریشه‌چه نشان داد که اثر تیمار نوع نانو ذرات بر این صفت در سطح احتمال ۵ درصد و اثر تیمار غلظت‌های متفاوت نانو ذرات و برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات بر آن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین وزن تر ریشه‌چه در نانو دی‌اکسید تیتانیوم در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و نانو تیوب کربن در غلظت‌های ۱۰ و ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد که البته با تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان نداد. کم‌ترین مقدار این

³ Suriyaprabha

⁴ Nazar Aliyan

⁵ Zhu and Gong

¹ Zhu

² Rahimi

همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که سیلیس سبب افزایش قطر ریشه و محتوای لیگنینی در مراحل اولیه جوانه در گیاه کلزا شد. همچنین، نتایج پژوهشی نشان داد که نانو ذرات سیلیس سبب افزایش ضخامت دیواره سلولی آوند چوبی در گیاه شنبليله شدند (نظرعلیان و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به این، افزایش مقدار سیلیسیوم از طریق افزایش جذب این نانو ذره و رسوب بیش‌تر این عنصر در دیواره سلولی و افزایش ضخامت دیواره سلولی سبب افزایش وزن ریشه‌چه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

به نظر می‌رسد تأثیر نانو ذرات در گیاهان علاوه بر اینکه به گیاه، گونه، نوع و غلظت نانو ذرات بستگی دارد، بسته به مرحله رشدی و فیزیولوژی گیاه نیز متفاوت است. در پژوهش حاضر نیز هر کدام از سه نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم، دی‌اکسید سیلیسیوم و نانو تیوب کربن اثرات متفاوت مثبت و منفی را در غلظت‌های مختلف بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر داشتند. با توجه به نتایج، با افزایش غلظت نانو ذرات از صفر به ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، میزان آنتوسیانین‌ها افزایش یافت. از آنجاییکه آنتوسیانین‌ها به هنگام مواجه با شرایط تنش، به عنوان سیستم دفاعی گیاه برای مقابله با اثرات ناشی از رادیکال‌های آزاد اکسیژن در گیاه تجمع می‌یابند، بنابراین پیشنهاد می‌شود با بررسی اثرات سوء نانو ذرات بر گیاه، در صورت لزوم، برای افزایش کارایی گیاه، از نانو ذرات در غلظت‌های پایین استفاده شود.

صفت در نانو دی‌اکسید تیتانیوم و غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر حاصل شد (جدول ۷).

نانو تیوب کربن در غلظت ۴۰-۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، با نفوذ به درون بذر و تحریک جذب آب، سبب بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه گوجه‌فرنگی شد (خداکاو اسکایا و همکاران، ۲۰۰۹). در پژوهشی که توسط نوروزی و همکاران (۲۰۱۲) به منظور بررسی اثر نانو ذرات نانو تیوب کربنی، نقره و روی بر گیاه باقلا انجام شد، نتایج نشان داد که برهمکنش نانو ذرات در غلظت آن‌ها بر وزن تر و خشک ریشه‌چه و وزن تر و خشک ساقه‌چه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید. نتایج به دست آمده از پژوهشی نشان داد که نانو دی‌اکسید تیتانیوم سبب افزایش وزن تر و خشک ریشه‌چه گیاه اسفناج شد. این نتیجه می‌تواند به دلیل افزایش جذب مواد غذایی معدنی و افزایش متابولیسم اسفناج توسط این ترکیب نانوئی باشد (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۶).

وزن خشک ریشه‌چه

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که اثر تیمار نوع نانو ذرات بر وزن خشک ریشه‌چه در سطح احتمال ۵ درصد و اثر تیمار غلظت نانو ذرات و برهمکنش نوع و غلظت نانو ذرات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین میزان وزن خشک ریشه‌چه به ترتیب در نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر و نانو تیوب کربن و در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد (جدول ۷).

رحیمی (۲۰۱۵) با بررسی اثر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم، دی‌اکسید سیلیسیوم و نانو تیوب کربن بر شاخص‌های جوانه‌زنی ارقام جو پوشینه‌دار و لخت، نشان دادند که برهمکنش بین نوع و غلظت نانو ذرات مذکور بر وزن خشک و وزن تر ریشه‌چه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد. در پژوهشی مشاهده شد که نانو دی‌اکسید سیلیسیوم در غلظت ۲۵ پی‌پی‌ام سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه‌چه گوجه‌فرنگی شده است (حقیقی و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه‌ای کوا^۲

¹ Yang

² Kuai

منابع

- Abbasi Khalaki, M., Ghorbani, A., and Moameri, M. 2016. Effects of silica and silver nanoparticles on seed germination traits of *Thymus kotschyanus* in laboratory conditions. *Journal of Rangeland Science*, 6(3): 221-231.
- Agrawal, R. 2003. *Seed Technology*, Published Company PVT. LTD. New Delhi. India.
- AL-Kaisi W.A., Muhsen T.A.A., and Hamed, A.S. 2012. Effect of mycorrhiza (*Glomus mosseae*) and superphosphate on physiological characters of *Hordeum vulgare*. *Journal of the College of Basic Education*, 18: 765-784.
- Asilbekova, D.T., Ulchenko, N.T., Rakhimova, N.K., Nigmatullaev, A.M., and Glushenkova, A.I. 2005. Seed lipids from *Crotalaria alata* and *Guizotia abyssinica*. *Chemistry of Natural Compounds*, 41: 596-597. <https://doi.org/10.1007/s10600-005-0217-5>
- Azimi, R., Heshmati, Gh., and Kavandi Habib, R. 2016. Evaluation of SiO₂ nanoparticle effects on seed germination in *Astragalus squarrosus*. *Journal of Rangeland Science*, 6(2): 135-143.
- Azimi, R., Jankju Borzelabad, M., Feizi, H., and Azimi, A. 2014. Interaction of SiO₂ nanoparticles with seed prechilling on germination and early seedling growth of tall wheatgrass (*Agropyron elongatum* L.). *Polish Journal of Chemical Technology*, 16(3): 25-29. <https://doi.org/10.2478/pjct-2014-0045>
- Bhat, J.G., and Murth. H.N. 2008. Haploid plant regeneration from unpollinated ovule cultures of Niger (*Guizotia abyssinica* (L. f.) Cass.). *Russian Journal of Plant Physiology*, 55: 241-245. <https://doi.org/10.1134/S1021443708020118>
- Callebaut, A., Hendrickx, G., Voets, A.M., and Motte, J.C. 1990. Anthocyanins in cell cultures of *Aiuga reptans*. *Phytochem*, 29(7): 2153-2158. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(90\)83027-X](https://doi.org/10.1016/0031-9422(90)83027-X)
- Chen, G., Qiu, J., Liu, Y., Jiang, R., and Cai, S. 2015. Carbon nanoparticles act as contaminant carriers and translocate within plants. *Scientific Reports*, 5:1-9.
- Crabtree, R.H. 1998. A new type of hydrogen bond. *Science*, 282: 2000-2001. <https://doi.org/10.1126/science.282.5396.2000>
- Dimkpa, C.O., McLean, J.E., Latta, D.E., Manango, E., Britt, D.W., Johnson, W.P., Boyanov, M.I., and Anderson, A.J. 2012. CuO and ZnO nanoparticles; phytotoxicity, metal speciation, and induction of oxidative stress in sand-grown wheat. *Journal of Nanoparticle Research*, 14: 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1125-9>
- Feizi, H., Ramezani Moghadam, P., and Fotovat, A. 2011. Wheat seed reaction to different concentrations of titanium dioxide nanoparticles compared to non-nano particles. The 2nd National Conference on Seed Science and Technology, Islamic Azad University, Mashhad Branch. Iran. [In Persian with English Summary].
- Ghodak, G., Deuk Seo, Y., Sung and Lee, D. 2011. Hazardous phytotoxic nature of cobalt and zinc oxid nanoparticles assessed using *Allium cepa*. *Journal of Hazard Mater*, 186(1): 952-955. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.018>
- Haghighi, M., Afifipour, Z., and Mozafarian, M. 2012. The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. *Journal of Biological and Environmental Science*, 6(16): 87-90.
- Haghighi, M., and Pessaraki, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161: 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.034>
- Hatami, M., Ghorbanpour, M., and Salehjarjomand, H. 2014. Nano-anatase TiO₂ modulates the germination behavior and seedling vigority of some commercially important medicinal and aromatic plants. *Journal of Environment Biological*, 8(22): 53-59.

- Heldt, H.W., and Piechull, B. 2011. Phenylpropanoids comprise a multitude of plant secondary metabolites and cell wall components, *Plant Biochemistry*, 4: 446-447. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384986-1.00018-1>
- Helland, A., Wick, P., Koehlar, A., Schmid, K., and Som, C. 2007. Reviewing the environmental and human health knowledge base of carbon nanotubes. *Environmental Health Perspectives*, 115(8): 1125-1131. <https://doi.org/10.1289/ehp.9652>
- Hunter E.A., Glasbey C.A., and Naylor, R.E. 1984. The analysis of data from germination tests. *Journal of Agriculture Science*, 102: 207-213. <https://doi.org/10.1017/S0021859600041642>
- Kalteh, M., Alipour, Z.T., Ashraf, Sh., Marashi Aliabadi, M., and Falah Noosratabadi, A.R. 2014. Effect of silica nanoparticles on basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress, *Journal of Chemical Health Risks*, 4(3): 49-55.
- Kenanakis, G., and Katsarakis, N. 2014. Chemically grown TiO₂ on glass with superior photocatalytic properties. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2: 1748-1775. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.015>
- Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li Z., and Watanabe, F. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. *ACS Nano*, 3(10): 3221-3227. <https://doi.org/10.1021/nn900887m>
- Kottegoda, N., Mmunaweera, L., Madusanka, N., and Karunaratne, V. 2011. A green slow release fertilizer composition based on urea- modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood. *Current Science*, 101: 43-78.
- Kuai, J., Sun, Y., Guo, C., Zhao, L., Zuo, Q., WU, J., and Zhou, G. 2017. Root-applied silicon the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. *Field Crops Research*, 200: 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.007>
- Kumar P., Pirjola L., Ketzler M.M., and Harrison R. 2013. Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources – a review. *Atmospheric Environment*, 67: 252-277. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.011>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu Y.G., and Christie, P. 2007. Mechanisms of silicon mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants, a review. *Environmental Pollution*, 147(2): 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Lu, C.M., Zhang, C.Y., Wen, J.Q., Wu, G.R., and Tao M.X. 2002. Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism, *Soybean Science*, 21(3): 168-172.
- Lukacova, Z., Svubova, R., Kohanova, J., and Lux, A. 2013. Silicon mitigates the Cd toxicity in maize in relation to cadmium translocation, cell distribution, antioxidant enzymes stimulation and enhanced endodermal apoplasmic barrier development. *Plant Growth Regulation*, 70: 89-103. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9781-4>
- Mahmoodzadeh, H., Nabavi, M., and Kashefi, H. 2013. Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus* L.). *Journal of Ornamental Plants (Journal of Ornamental and Horticultural Plants)*, 3(1): 25-32.
- Maksymiec, W. 2007. Signaling responses in plant to heavy metal stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29: 177-187. <https://doi.org/10.1007/s11738-007-0036-3>
- Nazar Aliyan, S., Majd, A., Ayeriyani, S., Ghahramani Nezhad, F., Najafi, F., and Gregor, M. 2016. Effect of silica and silica nanoparticles on the germination of seeds and growth of fennel plants (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Journal of Evolutionary Biology*, 3: 53-62.
- Nel, A., Xia, T., Madler, L., and Li, N. 2006. Toxic potential of materials at the nano level. *Science Magazine*, 311: 622-627.

- Noroozi, M., Amoo Aghayi, R., and Noroozi, S. 2012. Evaluation of germination ability of soybean seeds using multi-wall carbon nanotubes. Defective defense in the agricultural sector. Qeshm Island. Civil Defense. [In Persian with English Summary].
- Noroozi, S. 2013. The effects of nano-silvers, zinc and multi wall carbon nanotube on nodulation, growth, yield and components of yield of faba bean (*Vicia faba* L.), Shahrekord University, Iran. [In Persian with English Summary].
- Rahimi, M. 2015. Effect of some nanoparticles on seed germination of hulled and hullless barley varieties (*Hordeum vulgare* L.), Shahrekord University, Iran. [In Persian with English Summary].
- Raskar, S., and Laware, S.L. 2013. Effect of titanium dioxide nano particles on seed germination and germination indices in onion. *Plant Sciences Feed*, 3(9): 103-107.
- Roohizadeh, G., Majd, A., and Arbabian, S. 2015. The effect of sodium silicate and silica nanoparticles on seed germination and growth in the *Vicia faba* L., *Tropical Plant Research*, 2(2): 85-89.
- Scott S.J., Jones R.A., and Williams W.A. 1984. Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24: 1192-1199. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060043x>
- Siddiqui, M.H., Al- Wahaibi, M., Firoz, M., Y. and Al-Khaishany, M.Y. 2015. Nanoparticles and Their Impact on Plants Nanotechnology and Plant Science, 303 p.
- Siddiqui, M.H., and Al-Wahaibi, M. 2014. Role of nano-SiO₂ in germination of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Journal of Biological Sciences*, 21(1): 13-17. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.04.005>
- Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Prabu, P., Rajendran, V., and Kannan, N. 2012. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous silica nanoparticles in soil. *Journal of Nanoparticles Research*, 14: 1294-1296. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1294-6>
- Tadayon, M.R., Falah, S.A., Fadaei Tehrani, A.A., and Norouzi, S. 2013. Effects of multi wall carbon nanotube and nanosilver on some physiological and morphological traits of faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Plant Process and Function*, 2: 61-72. [In Persian with English Summary].
- Tiwari, D. K., Dasgupta-Schubert, N., Villasenor Cendejas, L.M., Villages, J., Carreto Montoya, L., Borjas Garcia, S.E. 2014. Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: Enhancements of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implication for nano-agriculture. *Applied Nanoscience*, 4: 577-591. <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0236-7>
- Wang, X., Wei, Z., Liu, D., and Zhao, G. 2011. Effects of NaCl and silicon on activities of antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa. *African Journal of Biotechnology*, 10: 545- 549.
- Wang, X.D., Ou-yang, C., Fan, Z., Gao, S., Chen, F., and Tang, L. 2010. Effects of exogenous silicon on seed germination and antioxidant enzyme activities of *Momordica charantia* under salt stress. *Journal of Animal and Plant Science*, 6: 700-708.
- Yang, F.S., You, W.J., Liu, C., Gao, F.Q., and Yang, P. 2006. Influences of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing Spinach. *Biological Trace Element Research*, 110: 179-190. <https://doi.org/10.1385/BTER:110:2:179>
- Zhang, L., Hong, F. Lu, S., and Liu, C. 2005. Effects of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. *Biological Trace Element Research*, 105: 83-91. <https://doi.org/10.1385/BTER:104:1:083>

- Zhu, H., Han, J., Xiao, J.Q., and Jin, Y. 2008. Uptake, translocation and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 713–717. <https://doi.org/10.1039/b805998e>
- Zhu, Y., and Gong, H. 2014. Beneficial effect of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34: 455-472.

Investigation of Seed Germination Indices and Anthocyanin Content of Niger (*Guizotia abyssinica*) Seedling under the Effect of Three Nanoparticles

Moazzameh Eskandarinasab¹, Mohammad Rafieiohossaini^{2,*}, Partoo Roshandel² and Mahmoud Reza Tadayon³

Extended abstract

Introduction: The use of nanotechnology as a diverse and applied discipline is ongoing in almost all areas of science. Fertilizers and nano-nutrients have the effective properties which help the production of plants, depending on their needs to regulate the plant growth. Plants under stress conditions tend to produce natural nanoparticles to continue their growth. Nano TiO₂ has a highly photocatalytic effect and as a catalyst, it is mainly used in water, electronic devices, conversion and storage equipment of energy as suspension. Sources of SiO₂ are very diverse, including natural nanoparticles, anthropogenic particles and engineering nanoparticles. Although silicon is not an essential element for growth in many crops, it has beneficial effects on plant growth and development. Today, carbon nanotubes are one of the most important materials in industrial programs. These materials, with different production methods and specific properties, can play an important role in the production of composite materials and have applications in medicine, electronics and energy storage. The Niger plant, with the scientific name of *Goizotia abyssinica* (L.F) Cass, belongs to the Asteraceae family. Its seeds are used in pharmacy, food industry, green manure and for feeding birds and cows. Therefore, the purpose of this experiment was to investigate the effect of type and concentration of three nanoparticles on some germination characteristics and anthocyanins content in Niger medicinal-oily plant.

Materials and Methods: In order to evaluate the effect of three nanoparticles on seed germination of Niger, an experiment was conducted as factorial in a completely randomized design with four replications. The treatments of TiO₂, SiO₂, and CNT were used as the first factor while their concentrations in four levels (zero, 10, 30 and 60 mg/l) were considered as the second factor. In this study, the traits of germination percentage, germination rate and mean of daily germination, germination and vigour index, length, fresh and dry weight of radicle and plumule, anthocyanin content and radicle resistance percentage were measured.

Results: The germination percentage, germination rate and mean of daily germination decreased by increases in nanoparticles concentration. The favorable effect of TiO₂ on germination index was obtained at the concentration of 30 mg/l and radicle dry weight at the concentration of 10 mg/l, compared to the control. The positive effect of SiO₂ was obtained on germination index and radicle dry weight at the concentrations of 10 and 60 mg/l, the anthocyanin content and the fresh and dry weight of plumule at the concentration of 60 mg/l, compared to the control. In addition, the appropriate effect of CNT on germination index was observed at the concentration of 10 and 30 mg/l, the anthocyanin content and radicle dry weight at the concentration of 60 mg/l and plumule fresh weight at the concentration of 30 mg/l.

Conclusions: According to the results of this study, it seems that the effect of nanoparticles in plants, apart from the plant itself, species, type and concentration of nanoparticles, varies depending on the growth stage and physiology of the plant. It seems that nanoparticles can increase the water absorption of seeds at some concentrations and increase seedling growth, which is because of their positive effects. Anthocyanins are produced by exposure to stress due to their antioxidant activity. In general, it can be said that increasing the concentration of nanoparticles causes the oxidative stress in the plant and the subsequent increase. Therefore, it is recommended that by investigating the bad effects of nanoparticles on plants, if necessary, use be made of nanoparticles at low concentrations (less than 60 mg/l) to increase the plant's efficiency.

Keywords: CNT, Mean of daily germination, Radicle dry weight, SiO₂, TiO₂

Highlights:

- 1- The effect of kind and concentration of nanoparticles on seed germination indices and anthocyanin content of Niger seedling.
- 2- Investigating the interaction effect of nanoparticle type and concentration as the physical priming factor of seeds on seed germination of multi-purpose Niger plant.

¹ M.Sc. Student of Seed Technology and Sciences, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Assistant Professor of Agronomy Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³ Associate Professor of Agronomy Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.23831251.1397.5.2.6.1>

<http://dx.doi.org/10.29252/yujs.5.2.73>

*Corresponding author, E-mail address: rafiei@sku.ac.ir