اثر پیش‌تیمار بذر با نانولوله‌های کربنی بر جوانه‌زنی و رنگیزه‌های فتوسنتزی ذرت تحت تنش خشکی

فصلنامه بوم‌شناسی گیاهان زراعی
جلد ۱۵، شماره ۳، صفحات ۱۲ – ۱
(پاییز ۱۳۹۸)

ابوالفضل شهریاری، حشمت امیدی✉، حسین محمدی پاکدهی، ابوالفضل محمدی خورزنی، خدیجه احمدی

گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران omidi@shahed.ac.ir ✉ (مسؤول مکاتبات)

چکیده این پژوهش با هدف بهبود کمی و کیفی جوانه‌زنی بذر دو هیبرید ذرت با کاربرد نانولوله‌های کربنی تحت شرایط تنش خشکی به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه فناوری بذر دانشگاه شاهد انجام شد. تنش خشکی با پلی‌اتیلن‌گلایکول ۶۰۰۰ در سطوح ۰/۵- و ۱- مگاپاسکال بر بذور پیش‌تیمار شده با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی دو هیبرید ذرت فجر و دهقان اعمال شد. نانوپرایمینگ تحت تنش خشکی توانست بر درصد و سرعت جوانه‌زنی، شاخص وزنی و طولی بنیه گیاهچه و محتوای کلروفیل a، b و کل و محتوای کارتنوئید دو هیبرید ذرت مؤثر باشد. کاربرد ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربن در تنش ۱- مگاپاسکال بر بهبود جوانه‌زنی هیبرید دهقان و فجر اثرگذار بود. همچنین کاربرد ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربن بر بهبود صفات محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی در تنش ۱- مگاپاسکال مؤثر بود. در مجموع، پیش‌تیمار بذر ذرت با لوله‌های کربنی موجب بهبود صفات جوانه‌زنی و رنگیزهای فتوسنتزی در شرایط تنش خشکی شد. بنابراین، برای بهبود وضعیت جوانه‌زنی بذور ذرت در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از روش پیش‌تیمار بذر با غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی توصیه می‌شود.

شناسه مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پژوهش: ۱۳۹۷

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۶/۱۰

واژه‌های کلیدی

- پرایمینگ بذر
- نانوپرایمینگ
- هیبرید دهقان
- هیبرید فجر

این مقاله با دسترسی آزاد تحت شرایط و قوانین The Creative Commons of BY - NC - ND انتشار یافته است.

10.22034/aej.2019. 1867216.1094

مقدمه نانو ذرات، ذرات اتمی یا مولکولی هستند که حداقل اندازه یک بُعد آن‌ها بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانو ذرات نسبت به مواد درشت دانه و با وزن معادل، سطح بزرگ‌تر و تعداد اتم بیش‌تر و در نتیجه سطح فعال بیش‌تری دارند.[۱۷] در نتیجه دارای خواص منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نظیر اندازه کوچک، واکنش‌پذیری بیوشیمیایی بالا، توانایی نفوذ در سلول و جابجایی سریع در داخل میکروارگانیسم‌ها نسبت به مواد درشت‌دانه هستند.[۲۲،۲۳]

فناوری نوین نانو اخیراً وارد عرصه کشاورزی شده است. نانولوله‌های کربنی[1] طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی از جمله الکترونیک، پزشکی، هوافضا و کشاورزی را در برمی‌گیرد.[۲۵] نانولوله‌های کربنی می‌توانند خصوصیات ریختی و فیزیولوژیک سلول‌های گیاهی را تغییر دهند.[۱۸] یکی از مؤثرترین اثرات نانولوله-های کربنی روی بذر گیاهان بالا بردن درصد و سرعت جوانه‌زنی می‌باشد. از آنجایی که ابعاد نانو ذرات بسیار کوچک و کم‌تر از ۱۰۰۰ نانومتر است، قابلیت عبور از منافذ موجود در پوسته بذر را داشته و از این طریق می‌توانند هم‌چون پلی‌مولکول‌های آب و یا اتم‌های عناصری مغذی را از درون به سمت دیگر جداره بذر انتقال دهند. جذب آب بیش‌تر می‌تواند موجب افزایش و تسریع فعل و انفعالات درون بذر گردد و بدین ترتیب تا حدی مکانیسم جوانه‌زنی را تحت تأثیر قرار دهد.[۱۸،۲۴] استفاده از نانولوله‌های کربنی می‌تواند باعث ایجاد رخنه در بذر شده و در نتیجه ورود اکسیژن به درون بذرها را تسهیل نماید. هم‌چنین این احتمال وجود دارد که نانولوله‌های کربنی با تأثیر بر کانال‌های عبور آب در غشاء و تنظیم عمل آن‌ها بتواند به ورود آب به درون سلول‌ها کمک کند.[۲۳]

خشکی می‌تواند روی جنبه‌های مختلف جوانه‌زنی مانند قدرت جذب آب، درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی،[۳] میانگین زمان جوانه‌زنی بذر قدرت جوانه‌زنی و بنیه بذر[۱۰] تأثیر منفی بگذارد. مرحله جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه از مراحل بحرانی رشد گیاهان می‌باشد. به موفقیت گذرانیدن این دو، نقش مهمی در مراحل دیگر استقرار گیاه خواهد داشت.[۳۳] سرعت جوانه‌زنی وابسته به نفوذپذیری پوسته بذر و مقدار آب موجود در منطقه جوانه‌زنی است.[۲۴]

یکی از روش‌های ساده و ارزان جهت کاهش تنش خشکی در گیاهان و افزایش جوانه‌زنی بذرها در شرایط نامطلوب محیطی استفاده از پیش‌تیمار بذر است.[۱] نانوپرایمینگ[2] روشی جدید برای افزایش بنیه گیاهچه و بهبود صفات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه می‌باشد.[۱۹]

گزارش شده که استفاده از نانو ذرات در کتان[3] سبب افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئید، بهبود شاخص‌های رشد و عملکرد تحت تنش خشکی می‌شود.[۹] *لو و همکاران (۲۰۰۲)* گزارش دادند که نانولوله‌های کربنی چند جداره می‌توانند به داخل دیواره سلولی گیاه تنباکو نفوذ کند و بارهای مختلفی را به اندامک‌های سلولی گیاه انتقال دهد.[۲۹] *تریپانی و همکاران (۲۰۱۱)* نشان دادند که نانولوله‌های کربنی می‌تواند سرعت رشد را در همهٔ بخش‌های نخود از جمله ریشه و ساقه افزایش دهد.[۳۶] *حشمتی دهکردی و موسوی (۲۰۱۳)* در طی پژوهشی اثر نانوپرایمینگ با استفاده از نانو دی‌اکسید تیتانیوم ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر را بررسی و نتیجه گرفتند که افزایش غلظت نانو دی اکسید تیتانیوم باعث بهبود صفات جوانه‌زنی گیاه جعفری شد و مناسب‌ترین غلظت را ۳۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر معرفی کردند.[۱۸]

اثر غلظت‌های مختلف نانولوله‌های کربنی روی جنبه‌های رشد و نموی گیاهچه‌های پیاز بررسی شد. غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله کربن موجب افزایش ویژگی‌های رشد گیاهچه پیاز شد و غلظت

[1] carbon nanotubes (CNTs)

[2] nano-priming

[3] *Linum usitatissimum* L.

۴۰ میلی‌گرم در لیتر اثر سمی داشت و موجب کاهش رشد شد.[۱۹]

وانگ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی اثر نانولوله‌های کربنی به میزان ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ و ۱۶۰ میکروگرم میلی‌لیتر بر جوانه‌زنی و فیزیولوژی گیاه گندم گزارش دادند که پس از ۷ روز قرار گرفتن بذور در محیط کشت نانولوله، رشد ریشه سریع‌تر و بیوماس تفاوتی نداشت.[۳۷]

ذرت[1] گیاهی از تیره گندمیان و از غلات مهم مناطق گرمسیری و معتدل جهان است. این محصول از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی مورد استفاده انسان، دام و طیور است. ذرت در سال ۲۰۱۲ در بین غلات از نظر عملکرد و میزان تولید در دنیا مقام اول و از نظر سطح زیر کشت مقام دوم را پس از گندم داشت.[۱۲]

یکی از عوامل مهم در رشد و عملکرد گیاه ذرت مانند سایر گیاهان زراعی استقرار مناسب می‌باشد. به‌طوری که عدم استقرار مطلوب گیاهچه‌ها در اراضی زراعی از مشکلات مهم کشاورزی است و باعث افزایش میزان مصرف بذر در واحد سطح و کاهش تراکم می‌گردد و بدین ترتیب عملکرد اقتصادی در واحد سطح را کاهش می‌دهد، که برآیند این اتفاقات افزایش هزینه تولید و کاهش درآمد کشاورز می‌باشد.[۱۲] استقرار مطلوب بذر تحت اثر کیفیت بذر به‌ویژه قدرت یا بنیه بذر، قوه نامیه و ظرفیت جوانه‌زنی است.[۲۲،۳۴]

پژوهش حاضر با هدف بهبود خصوصیات جوانه‌زنی بذر دو هیبرید ذرت با کاربرد پیش‌تیمار نانولوله‌های کربنی تحت شرایط تنش خشکی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها این پژوهش در آزمایشگاه فناوری بذر دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد در سال ۱۳۹۷ صورت گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با دو هیبرید فجر و دهقان ذرت و پیش‌تیمار با نانولوله‌های کربنی در سه سطح ۰، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و تنش خشکی در سه سطح ۰، ۰/۵- و ۱- مگاپاسکال با سه تکرار اجرا شد.

بذور هیبرید ذرت از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. نانولوله‌های کربنی نیز با خلوص ۹۸٪، از شرکت پیشگامان نانو مواد ایران خریداری و جهت تهیه محلول خشکی نیز از پلی‌اتیلن گلایکول ۶۰۰۰ استفاده گردید.

برای هر یک از ظروف پتری ۲۵ عدد بذر سالم که قبلاً با هیپوکلریت سدیم ۱۰٪ ضدعفونی و با آب مقطر سترون به خوبی شسته شدند، استفاده شد. بذرها درون ظروف پتری سترون حاوی کاغذ صافی واتمن شماره ۱ قرار گرفته و پس از اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر از محلول‌های ۰، ۰/۵- و ۱- بار پلی اتیلن گلایکول به تناسب هر تیمار، در دمای ۱ ± ۲۵ درجهٔ سلسیوس و ۱۶ ساعت روشنایی نگهداری شدند.[۴]

شمارش جوانه‌زنی تا ۱۴ روز به صورت روزانه و بر اساس خروج ریشه‌چه ۲ میلی‌متری ادامه یافت.[۲۰] بعد از ثابت شدن جوانه‌زنی طول ریشه‌چه و ساقه‌چه نیز اندازه‌گیری شد. در این آزمایش، وزن خشک گیاهچه با قرار دادن نمونه‌ها در درون آون با دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت تعیین گردید.[۳۲] به فواصل یک روزه صفات درصد جوانه‌زنی، میانگین مدت زمان جوانه‌زنی، ضریب سرعت جوانه‌زنی، شاخص وزنی و طولی بنیه گیاهچه، محتوای رطوبت نسبی، محتوای کلروفیلa، b و کل، محتوای کاروتنوئید اندازه‌گیری و ثبت شد.[۷،۲۰،۲۶]

جهت اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر اندام هوایی، در مرحله دو برگچه‌ای ۰/۲ گرم از اندام هوایی به همراه ۱۰ میلی‌لیتر استن ۸۰٪ ساییده شد. پس از

[1] *Zea mays* L.

۱۵ دقیقه سانترفیوژ در دور ۱۳۰۰۰ در دقیقه آن را به حجم ۲۰ میلی‌لیتر رسانده و پس از کالیبره کردن اسپکتروفتومتر[1] با استن ۸۰٪ (شاهد) جذب عصاره حاصل در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد.[۶،۱۵] با استفاده از اعداد به دست آمده از هر نمونه و مقدار کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) محاسبه شدند.

رابطه (۱) $Ca = 12.7\ (A663) - 2.69\ (A645) \times V/1000W$

رابطه (۲) $Cb = 22.9\ (A645) - 2.69\ (A663) \times V/1000W$

رابطه (۳) $CT = 20.2\ (A645) + 8.02\ (A663) \times V/1000W$

رابطه (۴) $Carotenoides = 100(A470) - 3.27(mg\ chl.a) - 104\ (mg\ chl.b)/227$

C میزان غلظت، V حجم محلول عصاره، W وزن تر نمونه استفاده شده و A جذب نوری در طول موج‌های مختلف است.

در نهایت داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 تجزیه و مقایسه میانگین با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

نتایج و بحث

درصد جوانه‌زنی

درصد جوانه‌زنی بذور ذرت به طور معنی‌داری تحت اثر نانولوله‌های کربن، تنش خشکی، ترکیب تیماری هیبرید در نانولوله‌های کربن و اثر سه‌گانه هیبرید در نانولوله‌های کربن و تنش خشکی قرار گرفت. هیبرید و اثرات دوگانه هیبرید در تنش خشکی و نانولوله‌ها در تنش خشکی اثر معنی‌داری بر درصد جوانه‌زنی نداشت (جدول ۱). درصد جوانه‌زنی در هیبریدهای فجر و دهقان در تنش ۱- مگاپاسکال کاهش پیدا کرد و هیبرید فجر در این سطح تنش ۱- مگاپاسکال و عدم کاربرد نانولوله‌های کربن واکنش بیش‌تری به کاهش درصد جوانه‌زنی نشان داد. تنش خشکی اثر کاهنده‌ای بر درصد جوانه‌زنی و سرعت جوانه‌زنی در هیبریدهای ذرت داشت که با نتایج *احمدی و همکاران (۲۰۱۸)* که اثر تنش خشکی را بر ژنوتیپ‌های گندم دروم مورد بررسی قرار دادند، همخوانی داشت که می‌توان کاهش جوانه‌زنی در اثر تنش خشکی را به کاهش رطوبت سلول و تأثیر آن بر ساخت پروتئین‌ها و ترشح هورمون نسبت داد.[۳] هیبرید دهقان با کاربرد غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله-های کربنی در تنش ۰/۵- مگاپاسکال درصد جوانه‌زنی بالایی نشان داد. در ادامه افزایش تنش خشکی در غلظت ۲۵ میلی‌گرم نانوپرایمینگ هیبرید دهقان با کاهش درصد بذرهای جوانه‌زده روبرو شد که به نظر می‌رسد افزایش غلظت نانوله-های کربنی برای بذور ایجاد مسمویت کرد و کاهش جوانه‌زنی را در پی داشت. در هیبرید فجر در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر درصد جوانه‌زنی با افزایش تنش خشکی تغییری نکرد و در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در هیبریدهای دهقان و فجر با افزایش سطح تنش خشکی با کاهش جزئی در درصد جوانه‌زنی روبرو شدند (جدول ۲).

میانگین مدت زمان جوانه‌زنی

نانولوله‌های کربنی، تنش خشکی و ترکیت تیماری اثر هیبرید در نانولوله‌های کربنی، هیبرید در تنش خشکی، هیبرید در تنش خشکی و اثر سه گانه هیبرید در نانولوله-های کربنی و تنش خشکی بر صفت میانگین مدت زمان جوانه‌زنی در سطح احتمال ۱٪ تأثیر معنی‌داری داشت (جدول ۱). باید توجه داشت که میانگین مدت زمان جوانه‌زنی با کیفیت بذر حالت عکس دارد. بدین معنی که هر قدر میزان میانگین مدت جوانه‌زنی کم‌تر باشد، کیفیت بذر بیشتر است. بیش‌ترین میانگین مدت زمان جوانه‌زنی در تنش ۱- مگاپاسکال مشاهده

[1] UV-Vis spectrophotometer Model Perkin Elmer manufactured by Lambda 25

شد، در هیبرید فجر غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم میانگین مدت زمان جوانه‌زنی را به سطح شاهد یعنی یک روز رساندند و نسبت به هیبرید دهقان در مدت زمان کم‌تری جوانه‌زدند. میانگین مدت زمان جوانه‌زنی در هیبرید دهقان در عدم نانوپرایمینگ دارای مدت زمان بیش‌تری بود تا بذر جوانه بزند (جدول ۲). با توجه به پژوهش *فرهی و همکاران (۲۰۱۱)* بررسی‌ها روی جوانه‌زنی نشان داد که کاربرد نانولوله‌های کربنی، بذور طی سه روز جوانه زدند، در حالی که بذور شاهد در طی این مدت جوانه نزده بودند.[۱۳] میانگین مدت زمان جوانه‌زنی بذر صفت بسیار مهمی در استقرار گیاهچه و استفاده مفید و مؤثر از شرایط محیطی می‌باشد.

ضریب سرعت جوانه‌زنی

ضریب سرعت جوانه‌زنی تحت اثر تیمارهای آزمایش قرار گرفت. هیبرید، نانولوله‌های کربنی، تنش خشکی و اثرات برهم‌کنش دوگانه و سه گانه آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ بر ضریب سرعت جوانه‌زنی معنی‌دار شدند (جدول ۱). تنش خشکی ضریب سرعت جوانه‌زنی را کاهش داد ولی در هیبرید دهقان در کاربرد غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی با افزایش تنش خشکی ضریب سرعت جوانه‌زنی افزایش یافت. هم‌چنین در هیبرید فجر در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در تنش ۰/۵- مگاپاسکال ابتدا با افزایش روبرو شد و در ادامه تنش خشکی کاهش یافت (جدول ۲). تأثیر نانو مواد بر افزایش میزان جوانه‌زنی بذور، بر پایه اثر آن‌ها در جذب آب از طریق جنین استوار است.[۲۳] باوجود اینکه ورود جسم خارجی به سلول‌های گیاهی به علت دیواره سلولی آن‌ها دشوار است، اما اخیراً توانایی نفوذ نانو لوله‌های کربنی از پوسته بذر گزارش شده است.[۲۳] آن‌ها نشان دادند نانولوله‌های کربنی با نفوذ در پوسته ضخیم بذر و افزایش جذب آب و تأثیر بر فعالیت‌های بیولوژیکی موجب افزایش رشد و سرعت جوانه‌زنی می‌شود. در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر ضریب سرعت جوانه‌زنی با افزایش سطوح تنش خشکی کاهش نشان داد (جدول ۲). نانولوله‌های کربنی با افزایش منافذ جدید در پوسته بذر می‌توانند موجب افزایش جذب آب شود. هم‌چنین این احتمال وجود دارد که نانولوله‌های کربنی با تأثیر بر کانال‌های عبور آب در پوسته بذر و تنظیم عمل آن‌ها بتوانند به ورود آب به درون سلول‌ها کمک کنند.[۲۳]

طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه

اثر اصلی هیبرید، نانولوله‌های کربن، تنش خشکی، اثر متقابل هیبرید در نانولوله‌های کربنی، هیبرید در تنش خشکی و نانولوله-های کربنی در تنش خشکی بر صفات طول ریشه‌چه تأثیر معنی‌داری نشان دادند. اثر هیبرید و اثر برهمکنش هیبرید در نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی بر صفات طول ساقه‌چه و نسبت طول ساقه‌چه به ریشه‌چه معنی‌دار نشدند. اثر متقابل هیبرید و نانولوله‌های کربن بر طوله ساقه‌چه تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). *منصوری و امیدی (۲۰۱۸)* بیان کردند که اگر جذب آب توسط بذر دچار اختلال گردد، فعالیت‌های متابولیکی جوانه‌زنی در داخل بذر به آرامی صورت خواهد گرفت، در نتیجه زمان خروج ریشه‌چه از بذر افزایش و از این رو سرعت جوانه‌زنی در داخل بذر به آرامی صورت خواهد گرفت.[۳۰] گیاهان تحت نانولوله‌ها کربنی دارای طول ساقه طویل‌تر بودند. مطابق مطالعات انجام شده، اثر نانو مواد بر رشد و نمو گیاهان به نوع مواد، غلظت مورد استفاده، گونه گیاهی مورد نظر و شرایط ویژه آزمایش وابسته است.[۲۶] *حقیقی و داسیلوا (۲۰۱۴)* بیان کردند که شکل استوانه‌ایی نانولوله‌های کربنی جذب آب و گاز را تسهیل می‌کند و موجب جوانه‌زنی و رشد راحت‌تر گیاهچه می‌شود.[۱۸]

وزن خشک گیاهچه

هیبرید، نانولوله‌های کربنی، تنش خشکی و اثرات دوگانه هیبرید در نانولوله‌های کربنی، هیبرید در تنش خشکی، نانولوله‌های کربنی در تنش خشکی و اثر برهمکنش سه‌گانه آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک گیاهچه داشتند (جدول ۱). وزن خشک گیاهچه هیبریدهای ذرت تحت اثر نانولوله‌های کربنی در عدم تنش خشکی افزایش نشان داد و با افزایش سطوح تنش خشکی و کاربرد نانو مواد کاهش یافت. وزن خشک گیاهچه در هیبرید دهقان در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در عدم تنش خشکی افزایش نشان داد. هم‌چنین وزن خشک گیاهچه در عدم کاربرد نانولولوه‌های کربنی و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در هیبرید دهقان و فجر در تنش ۱- مگاپاسکال با کاهش روبرو شد (جدول ۲).

شاخص طولی و وزنی بنیه گیاهچه

شاخص وزنی بنیه گیاهچه تحت اثر تیمارهای مورد بررسی در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت. اثر هیبرید و اثرات متقابل هیبرید در نانولوله‌های کربنی و اثر برهم‌کنش هیبرید، نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی بر شاخص طولی بنیه گیاهچه تأثیر معنی‌داری نداشت و دیگر سطوح تیماری بر این صفت معنی‌دار بودند (جدول ۱). افزایش تنش خشکی کاهش شاخص وزنی بنیه گیاهچه را در هیبریدهای دهقان و فجر را در پی داشت. هیبرید دهقان در عدم تنش خشکی و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی دارای بیش‌ترین شاخص وزنی بنیه گیاهچه بود در حالی که هیبرید فجر در این غلظ نانوپرایمینگ و تنش ۱- مگاپاسکال کم‌ترین شاخص وزنی بنیه گیاهچه را داشت. هیبرید دهقان شاخص وزنی بنیه گیاهچه بالاتری در سطوح نانولوله‌های کربنی نسبت به هیبرید فجر نشان داد. تغییر در مقدار شاخص بنیه گیاهچه در هیبرید دهقان و غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوپرایمینگ کم‌تر بود (جدول ۲).

محتوای رطوبت نسبی

محتوای رطوبت نسبی تحت تأثیر تیمارهای آزمایش به جز اثر هیبرید قرار گرفت (جدول ۱). محتوای رطوبت نسبی نیز تحت تأثیر سطوح تیمارهای مورد بررسی قرار گرفت به گونه‌ای که تنش خشکی باعث کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ هیبریدهای دهقان و فجر شد و مقدار محتوای رطوبت نسبی در عدم تنش خشکی و کاربرد غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی را می‌توان مشاهده کرد. بارزترین علایم فیزیولوژیک کمبود رطوبت، کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ‌ها می‌باشد[۲۸] و با افزایش شدت تنش خشکی، شرایط جذب آب برای گیاهان مشکل‌تر شده و در نتیجه مقدار آب موجود در سلول‌های گیاهی کاهش و کاهش محتوای رطوبت نسبی تأثیر منفی بر تقسیم یاخته‌ای و رشد و نمو گیاه دارد.[۲] بسیاری از پژوهشگران معتقدند که کاهش میزان محتوای رطوبت نسبی برگ در اثر تنش خشکی مربوط به انسداد روزنه‌ها می‌باشد و علت انسداد روزنه‌ها را تجمع هورمون آبسزیک اسید می‌دانند، به‌طوری که این هورمون در شرایط تنش خشکی در ریشه ساخته شده و در سلول‌های روزنه‌ای تجمع می‌یابد.[۲۷] بنابراین کاهش محتوای رطوبت نسبی برگ در اثر تنش رطوبتی، اثرات منفی در سیستم و ساختار فتوسنتزی گیاه به دنبال دارد.[۳۲] در تنش ۱- مگاپاسکال در هیبرید فجر افزایش محتوای رطوبت نسبی با کاربرد ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانوپرایمینگ مشاهده شد. محتوای رطوبت نسبی در تنش ۱- مگاپاسکال و عدم استفاده از نانولوله‌های کربنی در هیبرید دهقان با سیر نزولی روبرو شد (جدول ۲).

جدول ۱) تجزیه واریانس صفات جوانه‌زنی و رنگیزه‌های فتوسنتزی دو هیبرید ذرت تنش خشکی تحت تأثیر پیش تیمار با لوله‌های نانوکربنی

Table 1) Analysis of variance the germination indices and photosynthetic pigments of two corn hybrids under drought stress affected by carbon nanotubes priming

Source of variation	df	mean of squares													
		germination percentage	mean germination time	germination rate	root length	shoot length	shoot/ root length	seedling dry weight	length seedling index	seedling weight index	relative water content	chlorophyll a content	chlorophyll b content	total chlorophyll content	carotenoids content
Hybrids Corn (H)	1	1.38ns	3.21**	14387.16**	87.51**	34.83ns	0.03ns	1.73**	5.30ns	33528.41**	2.13ns	10.96ns	9.11**	40.02**	4.69**
Carbon nanotubes (N)	2	8.22**	0.05**	77.81**	25.73**	2.01**	0.06*	0.13**	18.43*	990.38**	110.54**	101.33**	37.09**	214.33**	43.42**
Drought (D)	2	10.49*	0.04**	122.61**	70.26**	448.40**	1.37**	5.54**	394.27**	37510.54**	260.70**	320.11**	145.46**	832.81**	206.52**
H * N	2	18.34**	0.11**	359.31**	20.16**	3.89ns	0.07*	0.94**	13.01ns	5113.87**	175.85*	244.37**	29.44**	391.93**	25.42**
H * D	2	2.45ns	0.02**	37.02**	34.50**	77.34**	0.06*	1.17**	86.80**	9593.98**	630.56**	19.10**	49.62**	119.43**	29.75**
N * D	4	2.89ns	0.01**	59.49**	26.54**	22.73**	0.09**	1.09**	33.82**	8211.95**	41.50*	50.81**	6.13*	82.48**	10.51**
H * N * D	4	8.76*	0.03**	90.56**	4.10ns	1.79ns	0.008ns	0.47**	3.97ns	4201.73**	147.42**	135.07**	90.74**	407.75**	86.47**
Error	54	2.95	0.001	5.20	1.59	3.06	0.01	0.04	4.58	230.79	37.62	10.82	2.55	22.60	0.57
CV (%)	-	1.74	3.11	2.71	10.25	19.05	19.20	21.43	14.80	18.02	8.15	14.95	15.89	14.76	5.70

* and ** significant at 5 and 1% probability level, respectively.

**و*به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱٪

جدول ۲) اثر تنش خشکی و نانولوله‌های کربن بر شاخص‌های جوانه‌زنی و فیزیولوژیکی هیبریدهای ذرت

Table 2) Effect of drought stress and carbon nanotubes on germination and physiological characteristics of corn hybrids

Drought stress (Mpa)	corn hybrids	nano-carbon tubes application (mg/L)	germination (%)	mean germination time (day)	germination rate (seed/day)	seedling dry weight (w)	seedling weight index (l)	relative water content (%)	chlorophyll a content (mg/g fw)	chlorophyll b content (mg/g fw)	total chlorophyll content (mg/g fw)	carotenoids content (mg/g fw)
0	Fajr	0	99.5 ab	0.99 fg	103.07 a	0.96 d-g	69.95 fgh	77.84 abc	17.46 de	7.03 ghi	24.63 ef	9.21 i
		25	99.5 ab	1.04 fg	99.50 ab	1.31 c	96.05 cde	82.55 a	10.43 f	3.88 j	14.46 g	6.28 j
		50	99.5 ab	1.08 f	94.95 cd	1.16 c-f	86.48 c-f	78.01 bcd	23.82 abc	10.33 ef	34.3 cd	13.72 efg
	Dehghan	0	99.5 ab	1.49 b	66.20 i	1.63 b	154.97 b	83.15 ab	10.82 f	4.82 ij	15.79 g	6.67 j
		25	99.5 ab	1.53 b	78.66 e	1.29 cd	107.09 cd	85.94 a	22.29 bcd	8.95 fgh	31.38 de	15.59 c
		50	98.33 ab	1.38 c	72.31 fg	2.97 a	258.34 a	75.84 a-d	17.20 de	6.48 hi	23.83 f	9.34 hi
-0.5	Fajr	0	97.83 ab	1.01 fg	99.50 ab	1.18 cde	84.63 def	76.64 abc	22.77 bc	9.34 fg	32.25 cd	17.38 b
		25	99.50 ab	0.99 fg	99.50 ab	0.80 ghi	58.56 g-j	66.2 def	25.27 abc	10.71 def	36.11 bcd	14.26 de
		50	99.50 ab	1.04 fg	101.22 ab	0.52 hi	36.90 j	73.01 bcd	26.20 ab	8.92 fgh	35.26 cd	13.44 efg
	Dehghan	0	98.50 ab	1.50 b	66.10 i	1.16 c-f	109.05 c	76.89 abc	24.11 abc	9.60 f	23.52 f	14.11 def
		25	100.00 a	1.41 c	70.17 gh	0.90 efg	82.17 efg	85.22 a	25.67 ab	12.36 cde	38.17 a-d	15.74 c
		50	98.33 ab	1.31 d	75.56 ef	0.63 ghi	52.68 hij	78.24 abc	21.52 b-e	9.68 f	31.34 de	12.90 g
-1	Fajr	0	92.50 c	1.26 e	98.1 bc	0.65 ghi	44.50 ij	75.94 a-d	26.60 ab	14.59 bc	43.32 ab	17.78 b
		25	99.50 ab	0.96 g	94.76 cd	0.70 ghi	52.17 hij	73.52 bcd	20.00 cde	17.74 a	37.88 a-d	19.80 a
		50	97.83 ab	0.98 g	91.83 d	0.46 i	35.05 j	73.52 bcd	27.96 ab	11.23 def	38.33 a-d	15.22 cd
	Dehghan	0	94.50 c	1.72 a	57.38 j	0.46 i	48.79 hij	57.87 f	16.65 e	6.73 hi	33.85 cd	14.40 de
		25	98.33 ab	1.26 d	65.21 i	0.68 ghi	68.35 f-i	69.95 cde	26.98 ab	12.95 cd	40.08 abc	16.05 c
		50	96.66 bc	1.31 d	75.56 ef	0.83 fgh	71.09 fgh	62.14 ef	29.24 a	15.79 ab	45.18 a	19.69 a

Similar letters in each column shows non- significant difference according to Duncan test at 5% level.

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ با آزمون دانکن می‌باشد.

محتوای کلروفیل a

اثر ساده نانولوله‌های کربن و تنش خشکی، اثرات دوگانه و اثر سه گانه هیبرید در نانولوله‌های کربنی در تنش خشکی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر صفت محتوای کلروفیل a داشتند و اثر هیبرید بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۱). نانولوله‌های کربنی در شرایط تنش ۱- مگاپاسکال افزایش محتوای کلروفیل را در هیبریدهای دهقان و فجر را در پی داشتند به‌طوری که هیبرید دهقان در تنش ۱- مگاپاسکال و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر دارای مقادیر بالایی از محتوای کلروفیل a بود و به دنبال آن در هیبرید فجر نیز مشاهده شد (جدول ۲). گزارش شده که با بروز تنش خشکی شاخص کلروفیل در گندم زمستانه افزایش یافت که احتمالاً به علت کاهش سطح برگ و تجمع کلروفیل در سطح کم‌تر باشد.[۸] طبق نتایج *چگینی و همکاران (۲۰۱۷)* اعمال تنش خشکی و نانولوله‌های کربنی بر محتوای رطوبت نسبی برگ، محتوای کلروفیل و کارتنوئید گیاه مریم گلی اثر معنی‌داری داشتند[۱۱] که در نتایج این پژوهش نیز مشاهده شد و اثر تنش خشکی و نانولوله‌های کربنی بر کلروفیل a هیبریدهای ذرت تأثیر داشتند. قدرت جالب توجه نانولوله‌های کربنی این است که به آسانی به داخل غشای سلول نفوذ کرده و بدون این که اثر سمیتی از خود نشان دهد بر چرخه فتوسنتزی اثر می‌گذارد و آن را افزایش می‌دهد.[۳۷]

محتوای کلروفیل b

اثرات اصلی هیبرید، نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی، اثرات دوگانه هیبرید در نانولوله‌های کربنی، هیبرید در تنش خشکی، نانولوله‌های کربنی در تنش خشکی و اثر سه گانه هیبرید در نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی بر محتوای کلروفیل b در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۱). حفظ غلظت کلروفیل و دوام فتوسنتز در شرایط تنش کمبود آب یکی از شاخص‌های فیزیولوژیکی تحمل خشکی است. محتوای کلروفیل b تحت ترکیب تیماری نانوپرایمینگ، هیبرید و تنش خشکی قرار گرفت. میزان کلروفیل b هیبرید فجر در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی و تنش ۱- مگاپاسکال افزایش چشمگیری نسبت به شاهد داشت و همچنین در این سطح تنش خشکی و غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در هیبرید دهقان نیز افزایش محتوای کلروفیل b مشاهده شد (جدول ۲).

محتوای کلروفیل کل

اثر اصلی هیبرید، نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی و همچنین اثر دوگانه هیبرید در تنش خشکی، هیبرید در نانولوله‌های کربنی، نانولوله‌های کربنی در تنش خشکی و ترکیب تیماری هیبرید در نانولوله‌های کربنی در تنش خشکی تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ بر محتوای کلروفیل کل داشتند (جدول ۱). اثر متقابل نانولوله‌های کربنی، هیبرید و تنش خشکی نشان داد که میزان محتوای کلروفیل کل با افزایش تنش خشکی بیش‌تر شد. تحت اثر کاربرد نانولوله‌ی کربنی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار تنش خشکی ۱- مگاپاسکال هیبرید دهقان افزایش معنی‌داری در محتوای کلروفیل کل نشان داد. در این پژوهش افزایش در محتوای کلروفیل کل گیاهچه نشان داد که ممانعت نانولوله کربنی از تخریب کلروفیل می‌تواند دلیل افزایش تحمل گیاه تحت تنش خشکی ۱- مگاپاسکال باشد (جدول ۲).

محتوای کاروتنوئید

تغییرات محتوای کاروتنوئید روند مشابهی با محتوای کلروفیل نشان داد. محتوای کاروتنوئیدی بافت برگ تحت تأثیر اثر اصلی هیبرید، نانولوله‌های کربنی و تنش خشکی، هم‌چنین اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱٪ قرار گرفت (جدول ۱). کاروتنوئیدها به عنوان حامی رنگدانه‌های

غیرفتوسنتزی و فتوسنتزی شناخته شده‌اند که می‌توانند نقش آنتی‌اکسیدانی از خود بروز دهند. در هر دو هیبرید بهره‌مندی از نانولوله‌ی کربنی توانست میزان تحمل به خشکی را افزایش دهد. از طرفی هیبریدها دارای واکنش پذیری متفاوتی نسبت به غلظت نانولوله‌های هیدروکربنی دارند. کاربرد نانولوله‌های هیدروکربنی ۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در هیبریدهای دهقان و فجر در شرایط تنش ۱- مگاپاسکال دارای میزان محتوای کاروتنوئید بیش‌تری بودند. با افزایش سطوح تنش خشکی محتوای رنگیزه های فتوسنتزی مانند کارتنوئید بافت برگ افزایش یافت. میزان کاروتنوئید در تیمار شاهد با پیش تیمار نانولوله‌ی کربنی در غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر در هیبرید فجر کاهش یافت. در هیبرید دهقان محتوای کاروتنوئید تحت تأثیر اثر ترکیب تیماری عدم تنش خشکی و عدم نانوپرایمینگ با کاهش روبرو شد (جدول ۲). افزایش میزان کاروتنوئید هیبریدهای ذرت در کاربرد نانوپرایمینگ می‌تواند یک اثر مثبت برای کاهش اثرات تنش خشکی و انتقال انرژی به کلروفیل باشد.

نتیجه‌گیری کلی جوانه‌زنی بذرهای تیمار شده هیبریدهای ذرت نسبت به بذرهای شاهد، زودتر آغاز شده و در نتیجه تحت تنش‌های محیطی این بذرها سریع‌تر استقرار یافته و زودتر از خاک خارج خواهند شد. بذرهای پیش‌تیمار شده با غلظت ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر نانولوله‌های کربنی هیبرید دهقان نسبت به شاهد بیشتر جوانه زدند و هم‌چنین نانوپرایمینگ لوله‌های کربنی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در هیبرید دهقان باعث افزایش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی در تنش خشکی ۱- مگاپاسکال شد. به‌طور کلی، استفاده از نانولوله کربن نقش به سزایی در افزایش مقاومت و بهبود مشخصه‌های جوانه‌زنی و بیوماس هیبریدهای ذرت تحت شرایط تنش خشکی داشت. پیش‌تیمار نانولوله‌های کربنی با غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر جهت بهبود صفات جوانه‌زنی و شاخص‌های فیزیولوژیک کلروفیل و کارتنوئید دو هیبرید ذرت فجر و دهقان پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری از مسؤولین آزمایشگاه‌های فیزیولوژی گیاهی و فناوری بذر دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد و به ویژه همکاری خانم روزبهانی به خاطر فراهم کردن امکانات لازم برای انجام این پژوهش تشکر می‌شود.

References

1. Afzal I, Basra SMA, Shahid M, Farooq M, Saleem M (2008) Priming enhances germination of spring maize (*Zea mays* L.) under cool conditions. Seed Science and Technology 36(2): 497-503.
2. Ahmadi-Azar F, Hasanloo T, Imani A, Feiziasl V (2015) Water stress and mineral zeolite application on growth and some physiological characteristics of Mallow *(Malva sylvestris*). Iranian Journal of Biology 28(3): 459-474. [in Persian with English abstract]
3. Ahmadi K, Darzi-Ramandi H, Fotokian MH (2018) Effect of terminal drought stress on germination characteristics of stressed plants of five durum wheat genotypes. Journal of Seed Research 7(4): 22-34. [in Persian with English abstract]
4. Amiri MB, Rezvani-Moghaddam P, Ehyai HR, Fallahi J, Aghhvany-Shajari M (2011) Effect of osmotic and salinity stresses on germination and seedling growth indices of artichoke (*Cynara scolymus*) and purple coneflower (*Echinacea purpurea*). Environmental Stresses in Crop Sciences 3(2): 165-176. [in Persian with English abstract]

5. An YY, Liang ZS, Zhang Y (2011) Seed germination responses of *Periploca sepium* Bunge, a dominant shrub in the Loess hilly regions of China. Journal of Arid Environments 75(5): 504-508.
6. Arnon DI (1949) Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24(1): 1-15.
7. Bajji M, Kinet JM, Lutts S (2002) Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* L. (Chenopodiaceae). Canadian Journal of Botany 80(3): 297-304.
8. Barraclough PB, Kyte J (2001) Effect of Water Stress on Chlorophyll Meter Reading in Winter Wheat. In: Horst WJ, Schenk MK, Burkert A, Claassen N, Flessa H (eds).Plant Nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems through Basic and Applied Research. Kluwer Academic Publishers: netherlands 722-723.
9. Bayazidi-Aghdam MT, Mohammadi H, Ghorbanpour M (2016) Effects of nanoparticulate anatase titanium dioxide on physiological and biochemical performance of *Linum usitatissimum* (Linaceae) under well-watered and drought stress conditions. Brazilian Journal of Botany 39(1): 139-146. [in Persian with English abstract]
10. Boydak M, Dirik H, Tilki F, Çalikoğlu M (2003) Effects of water stress on germination in six provenances of Pinus brutia seeds from different bioclimatic zones in Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 27(2): 91-97.
11. Chegini E, Ghorbanpour M, Hatami M, Taghizadeh M (2017) Effect of multi-walled carbon nanotubes on physiological traits, phenolic contents and antioxidant capacity of *Salvia mirzayanii* Rech. f. & Esfand.under drought stress. Journal of Medicinal Plants 16(62): 191-207. [in Persian with English abstract]
12. Enayati V, Esfandiari A, Al Hashem MH, Hozori A (2014) Effect of seed burning on germination indices and heterotrophic growth of maize seedlings. Journal of Seed Research 12(3): 6761-6167. [in Persian with English abstract]
13. Farehi R, Daraiee S, Hosseini SM, Shafiee F (2011) Increasing germination of plant seeds using carbon nanotubes. Proceedings of the Fifth National Conference on New Ideas in Agriculture. Islamic Azad University of Khorasgan Branch (Isfahan). Khorasgan, Iran. [in Persian with English abstract]
14. Gholami M, Rahemi M, Kholdebarin B (2010) Effect of drought stress induced by polyethylene glycol on seed germination of four wild almond species. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 4(5): 785-791. [in Persian with English abstract]
15. Gu Z, Chen D, Han Y, Chen Z, Gu F (2008) Optimization of carotenoids extraction from *Rhodobacter sphaeroides*. Learning With Technologies- Food Science and Technology 41(6): 1082-1088.
16. Haghighi M, Afifipour Z (2011) The effect of priming with carbon nanotubes, nano-titanium and copper nanoparticles on germination characteristics of onion. Proceedings of the First National Congress of Science and New Technologies of Agriculture. Zanjan University, Zanjan, Iran. [In Persian]
17. Haghighi M, Afifipour Z, Mozafarian M (2012) The effect of N-Si on tomato seed germination under salinity levels. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences 6(16): 87–90. [in Persian with English abstract]
18. Haghighi M, Da Silva JAT (2014) The effect of carbon nanotubes on the seed germination and seedling growth of four vegetable species. Journal Crop Science Biotechnology 17(4): 201-208. [in Persian with English abstract]
19. Hashemi-Dehkourdi E, Mousavi M (2013) Effect of anatase nanoparticles (TiO_2) on parsley seed germination (*Petroselinum crispum*) in vitro. Biological Trace Element Research 155(2): 283-286.
20. ISTA (International Seed Testing Association) (2010) International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association: Bassersdorf, Switzerland.
21. Jiang Y, Hua Z, Zhao Y, Q Liu, Wang F, Zhang Q (2014) The effect of carbon nanotubes on rice seed germination and root growth. In: Zhang TC, Ouyang P, Kaplan S, Skarnes B (eds). Proceedings of the 2012 International Conference on Applied Biotechnology (ICAB 2012). Springer, Berlin, Heidelberg 1207-1212.
22. Kapoor N, Arya A, Siddiqui MA, Amir A, Kumar H (2010) Seed deterioration in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under accelerated aging. Asian Journal of Plant Sciences 9(3): 158-162.

23. Khodakovskaya M, Dervishi E, Mahmood M, Xu Y, Li Z, Watanabe F, Biris AS (2009) Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. ACS Nano 3(10): 3221-3227.
24. Khodakovskaya MV, de Silva K, Biris AS, Dervishi E, Villagarcia H (2012) Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. American Chemical Society Nano (ACS Nano) 6(3): 2128-2135.
25. Lahiani MH, Chen J, Irin F, Puretzky AA, Green MJ, Khodakovskaya MV (2015) Interaction of carbon nanohorns with plants: Uptake and biological effects. Carbon 81(1): 607-619.
26. Levitt J (1980) Response of Plants to Environmental Stresses: Water, Radiation, Salt and Other Stresses. Academic Press: New York.
27. Liu Q, Chen B, Wang Q, Shi X, Xiao Z, Lin J, Fang X (2009) Carbon nanotubes as molecular transporters for walled plant cells. Nano letters American Chemical Society 9(3): 1007-1010.
28. Liu X, Huang B (2000) Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bent grass. Crop Science Society of American 40 (2): 503- 510.
29. Lu CM, Zhang CY, Wen JQ, Wu GR, Tao MX (2002) Research of the effect of nanometer materials on germination and growth enhancement of *Glycine max* and its mechanism. Soybean Science 21(3):168-171.
30. Mansouri A, Omidi H (2018) Effects of potassium nitrate on germination indices of green basil (*Ocimum basilicum* L.) under water deficit stress. Journal of Seed Research 8(2): 20-28. [in Persian with English abstract]
31. Nautiyal PC, Rachaputi NR, Joshi YC (2002) Moisture-deficit-induced changes in leaf-water content, leaf carbon exchange rate and biomass production in groundnut cultivars differing in specific leaf area. Field Crops Research 74(1): 67-79.
32. Parmoon G, Ebadi A, Jahanbakhsh Godahkahriz S, Davari M (2015) Effect of seed priming by salicylic acid on the physiological and biochemical traits of aging milk thistle (*Silybum marianum*) seeds. Electronic Journal of Crop Production 7(4): 223-234. [in Persian with English abstract]
33. Pour Mombeini S, Moalemi N (2016) Effect of hydro and osmo-priming in combination with GA_3 and KNO_3 on seed germination of dodonaeaviscosaunder salinity conditions. Journal of Horticultural Science 30(1): 102-111. [in Persian with English abstract]
34. Siadat SA, Moosavi A, Sharifzadeh M (2012) Effects of seed priming on antioxidant activity and germination characteristics of maize seeds under different aging treatments. Research Journal of Seed Science 5(2): 51-62. [in Persian with English abstract]
35. Siddique MRB, Hamid A, Islam MS (2000) Drought stress effects on water relations of wheat. Botanical Bulletin- Academia Sinica Taipei 41(1): 35- 39.
36. Tripathi S, Sonkar SK, Sarkar S (2011) Growth stimulation of gram (*Cicer arietinum*) plant by water soluble carbon nanotubes. Nanoscale 3(3): 1176-1181.
37. Wang X, Han H, Liu X, Gu X, Chen K Lu D (2012) Multi-walled carbon nanotubes can enhance root elongation of wheat (*Triticum aestivum*) plants. Journal of Nanoparticle Research 14(6): 1-10.

The effect of carbon nanotubes seed priming on germination and photosynthetic pigmentation of maize hybrids under drought stress

Agroecology Journal
Vol. 15, No. 3 (1 - 12)
(autumn 2019)

Abolfazl Shahriari, Heshmat Omidi✉, Hossein Mohammadi Pakdehee, Abolfazl Mohammadi Khorzani, Khadijeh Ahmadi

Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences, Shahed University, Tehran, Iran
✉ omidi@shahed.ac.ir (**corresponding author**)

Received: 14 May 2019 **Accepted:** 01 September 2019

Abstract To investigation the effect of carbon nanotubes (CNTs) seed priming to enhance seed germination quantity and quality of corn hybrids under drought stress, an experiment was conducted as factorial based on completely randomized design at Seed Technology Laboratory of Shahed University, Tehran, Iran. Drought stress induced by -0.5 and -1 Mpa polyethylene glycol solution on Fajr and Dehghan maize hybrids and the seeds primed by 25 and 50 mg/L CNTs. Nano-priming under drought stress was effective on germination percentage and rate, weight and length, chlorophyll a, b, and total chlorophyll and carotenoid contents of maize seedlings. Application of 25 mg/L CTNs at -1 Mpa drought stress effectively enhanced germination percentage of maize seed. Also, application of 50 mg/L CTNs improved photosynthetic pigmentation at -1 Mpa drought stress. Generally, CTNs priming improved seed germination traits and photosynthetic pigmentation of maize seedlings under drought stress conditions. Therefore, priming by 25 mg/L CTNs is recommended to improve maize seeds germination indices in arid and semi-arid regions.

Keywords
- Dehghan hybrid
- Fajr hybrid
- nanopriming
- seed priming

This open-access article is distributed under the terms of the Creative Commons-BY-NC-ND which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

10.22034/aej.2019. 1867216.1094