

اثر نانوذره‌های تیتانیوم دی‌اکسید بر تنزگی و شاخص‌های رشد بذر بلوت در تنش خشکی

مریم حشمتی^۱، مزگان کوثری^{۲*}، حسن فیضی^۱

۱. گروه تولیدات گیاهی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. بخش بیوتکنولوژی میکروبی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* kowsari@abri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۱۵، تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۸

چکیده

در سال‌های اخیر بخش‌های بزرگی از جنگل‌های زاگرس به دلیل بحران زوال بلوت از بین رفته و موجودیت بخش‌های بیشتری از آن به مخاطره افتاده و ساختار توده‌های جنگل دستخوش تغییرهایی ناخوشایند شده است. یافتن راهکارهایی برای افزایش توان استقرار نهال‌های جدید در عرصه می‌تواند کمکی در زمینه احیای دوباره جنگل باشد. در این پژوهش از پتانسیل نانوذره‌های تیتانیوم دی‌اکسید برای کاهش اثرهای مخرب تنش خشکی بر بذر بلوت استفاده شد. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل در محدودیت تنزگی گیاهان است. تیمارهای اعمال شده شامل ۴ سطح نانوذره‌های تیتانیوم (صفر، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و ۴ سطح تنش خشکی (صفر، ۳، ۶، ۹- بار) اعمال شده توسط پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰، بود. سطح صفر در هر دو تیمار به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کامل تصادفی با دو عامل و سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که تنش خشکی به‌ویژه در سطوح بالا بر بیشتر فاکتورهای رشدی اثر منفی داشته است. تنش خشکی بالای ۶- بار اثر منفی بر رشد ریشه داشت و تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر تیتانیوم دی‌اکسید با تنش خشکی ۳- بار بیشترین وزن تر ریشه (۷۲۲۸/۳ میلی‌گرم) و بیشترین طول ریشه (۱۲۷/۳۳ میلی‌متر) را ایجاد کرد. سطوح بالای تنش خشکی شمار و سطح برگ‌ها را کاهش داد. اگرچه بین تیمارهای نانوذره اختلاف آماری معنی‌داری در طول ساقه‌چه و شمار برگ‌ها وجود نداشت اما تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره مقدار عددی بیشتری نسبت به دیگر تیمارها داشت. یافته‌ها نشان داد که بیشترین درصد تنزگی و پیدایش گیاهچه در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره و سطوح صفر و ۳- بار تنش خشکی و کم‌ترین درصد پیدایش در تیمار بدون نانوذره و سطح ۹- بار تنش خشکی حاصل شد. برهمکنش نانوذره‌ها و تنش خشکی در سطح یک درصد بر تغییرات قطر طوقه معنی‌دار بود. غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره در سطح ۶- بار تنش خشکی قطر طوقه را به‌طور میانگین ۲/۶۳ میلی‌متر نسبت به شاهد افزایش داد. بیشترین شمار ریشه‌های جانبی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و سطح ۳- بار تنش خشکی به‌دست آمد. یافته‌ها نشان داد زمانی که تیمار نانوذره همراه با تنش خشکی به کار رفته است گیاه آستانه تحمل تنش خود را برای زیوایی بهتر در شرایط تنش افزایش داده است. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان بیان نمود که غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره مناسب‌ترین تیمار برای بهبود مشخصات ریشه و کاهش اثر تنش خشکی در گیاه بلوت است. پژوهش حاضر نخستین پژوهش انجام شده روی اثر تیمار نانوذره بر ویژگی‌های رویشی بذر بلوت است.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، جنگل، تیتانیوم دی‌اکسید، زوال بلوت.

مقدمه

گلابی‌های وحشی، گون‌های گزی و دیگر درختان در منطقه زاگرس هستیم و با تاسف هنوز به طور علمی و دقیق راهکاری برای پیشگیری از این پیامدها شناسایی نشده است. عوامل فراوانی از جمله خشکی در گسترش این پدیده نقش دارند و می‌توان گفت یکی از راهکارهای موثر برای احیا جنگل‌های تخریب شده ایجاد بذور و نهال‌های توانمند در برابر تنش‌های محیطی منطقه به‌ویژه خشکی است. اگر درصد ریشه زایی بذور افزایش یافته و حجم و عمق ریشه و جذب آب و در پایان پایداری و استقرار نهال‌ها در عرصه افزایش یابد، گام بزرگی در بازسازی جنگل‌های تخریب یافته خواهد بود. امروزه با استفاده از نانومواد موفقیت‌های قابل توجهی در زمینه افزایش تحمل گیاهان به عوامل و تنش‌های محیطی، افزایش تنژگی و رشد بذور، بهبود عملکرد گیاه، بازیافت و استفاده دوباره از مواد، انرژی و آب، و کاهش آلودگی به دست آمده است. استفاده از روش‌های نوین با هدف بهبود ویژگی‌های تنژگی بذرها و در پی آن ویژگی‌های رویشی نهال‌های به وجود آمده برای درختان جنگلی می‌تواند در بالا بردن کیفیت مناطق جنگل‌کاری مؤثر باشد. نانوفناوری در جهان به سرعت در حال پیشرفت است و می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور به صنعتی تریلیون دلاری تبدیل شود (Ma et al., 2010). این فناوری یکی از پیشرفت‌های بسیار نوینی است که با استفاده از نانوذره‌ها که تغییرهای فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای در آن‌ها ایجاد شده، جایگاه برجسته‌ای در علوم مختلف از جمله علوم گیاهی و کشاورزی پیدا کرده است (Scrini & Lyons, 2007; Singh & Lee, 2016; Rop et al., 2019; Tiwari et al., 2020; Xu et al., 2020). در برخی پژوهش‌ها موضوع ساخت نانوذره‌های فلزی از گیاهان

ناحیه رویشی زاگرس با مساحتی حدود ۵/۲ میلیون هکتار یکی از مهم‌ترین مناطق جنگلی ایران محسوب می‌شود. در فلور گیاهان چوبی زاگرس مهم‌ترین گونه‌ها به لحاظ وسعت و قدمت، گونه‌های بلوت می‌باشند. بلوت، درختی بزرگ و گسترده است که دارای شکل توپر، حجیم و گسترده با تاجی گنبدی شکل و برگ‌های موج‌دار در لبه، و همچنین میوه‌ای که درون یک محفظه فنجان مانند است. بیشتر زیبایی این درخت مربوط به حالت رشد آن است. در بسیاری از کشورها، درخت بلوت را نماد قدرت و استقامت می‌دانند. به همین دلیل در نمادهای کشورهای مختلف وارد شده است (2018; Kremer & Hipp, Ashley et al., 2019; Hipp et al., 2020). جنگل‌های زاگرس به عنوان دومین اکوسیستم جنگلی طبیعی کشور، نقش بسیار ارزنده‌ای در تأمین منابع آب و تعادل اقلیمی کشور دارد. با تاسف این جنگل‌ها در سال‌های اخیر در برابر آسیب‌های فراوان بوده و مورد تخریب جدی قرار گرفته‌اند، به طوری که گستره قابل توجهی از جنگل‌های زاگرس به ویژه در استان ایلام در دهه گذشته مبتلا به بحران زوال بلوت^۱ شده‌اند (Hosein zade et al., 2015; Ahmadi et al., 2019). عوامل فراوانی در بروز این پدیده دخیل هستند که بر حسب منطقه و شرایط رویشگاه می‌توانند نوسان داشته باشند (Maleknia et al., 2006; Alidadi et al., 2019). امروزه با توجه به شرایط مختلف اقلیمی حاکم بر دنیا و منطقه ما، دخالت بی‌رویه انسان‌ها، پیدایش و طغیان آفات و بیماری‌های مختلف، روند تخریب جنگل‌ها شدت زیادی به خود گرفته است. همچنین شاهد وضعیت ناخوشایندی همچون پدیده‌های نوپیدایش زوال بلوت‌ها، ارژن‌ها،

1. *Quercus* spp.
2. Oak decline

گزارش شده است (Hong *et al.*, 2005; Boykov *et al.*, 2019).

هر درخت بلوت از سن ۲۰ تا ۵۰ سالگی تولید میوه را آغاز می کند و پس از آن هر سال حدود ۲۰۰۰ میوه می دهد. با این حال از هر ۱۰۰۰۰ میوه تنها یک دانه بلوت می تواند به درخت تبدیل شود. تولید بذر از موضوع های جدی در توده های جنگلی است. اهمیت این موضوع در جنگل های بلوت بسیار زیاد است، زیرا بذر هم منبع اصلی افزایش جنسی این درختان محسوب می شود و هم منبع غذایی مهمی برای حیوانات جنگلی است. توان تولید بذر پایه های مختلف بلوت به دلیل تفاوت در ساختار ژنتیکی، رویشگاه و اقلیم متفاوت است. خشکیدگی و زوال بلوت پدیده مهم و پیچیده ای است که از حدود یک قرن پیش در بیشتر جنگل های بلوت دنیا روی داده و در سالیان اخیر نیز در جنگل های بلوت زاگرس به دنبال خشکسالی های پی در پی رخ داده است. هرچند عامل های فراوانی در رخداد خشکیدگی های درختی دخیل هستند، اما خشکسالی ها و بروز تنش های خشکی شدید می تواند سبب شود که درختان نتوانند آب مورد نیاز خود را به اندازه کافی به دست آورده و دچار ضعف فیزیولوژیک شوند (Jenkins & Pallardy, 1995; Bigler *et al.*, 2006). تنش خشکی یکی از مهم ترین تنش های نازیوا است که بر بیشتر مراحل رشد گیاه مانند تولید بذر، مرحله تنژگی و استقرار گیاهچه و همچنین ساختار اندام و فعالیت آن ها آثار مخرب و زیان آوری وارد می سازد (Safarnejad, 2004; Shabala *et al.*, 2000). کاهش جذب آب و در پی آن کاهش فعالیت های آنزیمی مربوط به فرآیندهای بیوشیمیایی تنژگی، علت اصلی کاهش سرعت تنژگی بذر در شرایط

مطرح شده که نشان دهنده این است گیاهان نیز می توانند به عنوان مسیرهای زیستی و سبز برای تولید نانوذره ها مطرح باشند (Sharma *et al.*, 2009). تیتانیوم دی اکسید از اکسیدهای فلزی است که در زندگی روزمره کاربرد یافته است. این ماده پودر سفیدرنگی است که دارای سه فاز کریستالی آناتیس^۱، روتایل^۲ و بروکیت^۳ است. تیتانیوم یکی از عناصر سودمند برای گیاه است و می تواند جذب برخی عناصر مانند نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و روی را تحریک نماید (Paris, 1983) که به برخی عامل های زیستی و خاک مثل گونه و رقم گیاه، pH، رطوبت و وضعیت عناصر غذایی در خاک بستگی دارد. تیتانیوم نانو اکسید به عنوان یک کاتالیزگر نوری در شرایط نور می تواند باعث واکنش اکسیداسیون احیا شود. اثر کوتاه مدت و فعالیت کاتالیزگر نوری تیتانیوم نانو اکسید بیشتر از مواد توده آن است به عبارت دیگر، تیتانیوم نانو اکسید می تواند واکنش اکسیداسیون احیا را ایجاد و در شرایط نور، الکترون دارای انرژی، آزاد کند. آزمایشی که برای بررسی اثر ذره های نانو و غیر نانو تیتانیوم دی اکسید بر تنژگی و رشد گیاهچه گندم صورت گرفت نشان داد که از بین شاخص های تنژگی، تنها میانگین زمان تنژگی زیر تأثیر تیمارها قرار گرفت و کمترین زمان مربوط به تیمار ۱۰ میلی گرم در لیتر از نانوذره های تیتانیوم دی اکسید (۰/۸۹ روز) و بیشترین زمان مربوط به تیمار شاهد (۱/۳۵ روز) بوده است (Feizi *et al.*, 2012). کاربرد نانوذره های تیتانیوم دی اکسید به عنوان تیمار بر بذرهای اسفناج باعث افزایش تنژگی و رشد این گیاه شده است (Zhang *et al.*, 2007; Mingyu *et al.*, 2005). تأثیر مثبت نانوذره های تیتانیوم دی اکسید بر فتوسنتز و غشای تیلاکوئیدی نیز

1. Anatase
2. Rutile
3. Brookite

چهار سطح تنش خشکی ۰ (شاهد)، ۳-، ۶- و ۹- بار، در سه تکرار بود. در این پژوهش از ظروف پلاستیکی دربسته با ابعاد طول ۲۰، عرض ۱۴ و ارتفاع ۸ سانتی متر به عنوان واحد آزمایش و از خاک با ترکیب خاک جنگل (۲ قسمت)، کوکوپیت + پرلایت (۱ قسمت) و خاک زراعی (۲ قسمت) به عنوان بستر کشت در محیط اتافک رشد (فیتوترون)^۱ استفاده شد.

تهیه محلول‌های نانوذره

پودر نانوذره های تیتانیوم دی‌اکسید TiO_2 P25AEROXIDE[®] از شرکت Evonik Degussa GmbH آلمان تهیه شد. خلوص پودر نانوذره ها ۹۹/۸٪ و میانگین اندازه ذره ها ۲۱ نانومتر بود. از آنجایی که نانوذره‌های تیتانیوم دی‌اکسید در آب تشکیل کلوخه می‌دهند بنابراین باید برای پخش کردن آن‌ها از اولتراسونیک استفاده کرد. ارلن‌ها به مدت ۲ ساعت در اولتراسونیک حمامی قرار داده شد و محلول به یکنواختی مناسبی رسید.

محلول سازی تنش خشکی

برای ایجاد محیط‌های مصنوعی کنترل ظرفیت آب، به طور معمول از موادی با جرم مولکولی بالا چون پلی‌اتیلن گلایکول به دلیل ایجاد محلول اسمزی با شرایط مشابه طبیعی، استفاده می‌شود. پلی‌اتیلن گلایکول استفاده شده از شرکت فلوکای آلمان تهیه شد. میزان جرمی از پلی‌اتیلن گلایکول که باید به کار می‌رفت از فرمول میشل-کافمن به دست آمد. برای تهیه محلول‌ها، تیتانیوم دی‌اکسید لازم برای تهیه ۱۰۰ میلی‌لیتر از هر یک از سطوح، در آغاز در ۷۰ میلی‌لیتر آب حل شد و سپس با اندازه گیری دمای آب و با استفاده از فرمول مقدار پلی‌اتیلن گلیکول لازم برای هر سطح از تنش خشکی محاسبه و به آن افزوده شد و در

تنش خشکی است (Malik et al., 1986). زوال بلوت گسترده ترین مشکل بحرانی بلوت است، درختان در واکنش به تنش ناشی از خشکسالی طولانی مدت با تبدیل نشاسته ذخیره شده در ریشه به قند و از بین بردن برگ‌ها به حمایت از متابولیسم ادامه می‌دهند، هنگامی که این ذخیره های موجود خالی شوند، درختان توانا به حفظ وضعیت معمول نیستند و این شروع زوال است. از آنجایی که درختان بلوت از نظراکوسیستم از دیدگاه ملی و بین‌المللی، ساختار ژنتیکی، ذخیره منابع آبی کشور، تولید اکسیژن و پیشگیری از ورود ریزگردها به داخل کشور، قابل توجه هستند، نگهداری از این منابع با ارزش و کمک به بهبود ویژگی های رویشی بذرهای آن‌ها، ضروری است. در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از توان ویژه نانو ذره ها، برای بهبود ویژگی های رویشی بذرهای بلوت، با هدف احیا جنگل های از بین رفته و کمک به کارآمدتر شدن فعالیت های نهالستان های بلوت در جنگل کاری، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر نانوذره های تیتانیوم دی‌اکسید بر شاخص‌های تنژگی و رشد بذر بلوت زیر تنش خشکی، این پژوهش انجام شد.

تهیه بذر

برای انجام آزمایش جمع‌آوری بذر از جنگل‌های استان ایلام، شهرستان‌های ایوان و شیره زول صورت گرفت و ۱۷۲ عدد بذر انتخاب شد.

شرایط آزمایش

آزمایش دارای چهار سطح غلظت نانوذره های تیتانیوم دی‌اکسید ۰ (شاهد)، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و

کوکوپیت+ پرلایت (۱ قسمت) و خاک زراعی (۲ قسمت) که توسط گرمادهی در کوره گندزدایی شده بود ریخته شد.

روش کاربرد تیمارها

بذرهای سالم جمع آوری شده با استفاده از پنبه و الکل ۲۰٪ زیر هود به صورت سطحی گندزدایی شدند، سپس برای از بین بردن احتمال آلودگی قارچی یک دقیقه در سدیم هیپوکلریت ۱٪ غوطه‌ور شدند. بذرهای خشک شدن سطح، به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند. سپس بذرهای به مدت ۳ ساعت در محلول نانو خیسانده شده و سپس خشک شدند. متناسب با سطح تنش مشخص شده، محلول پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ آماده شده برای بذرهای گندزدایی شده افزوده شد و به مدت ۲۴ ساعت در آن محلول غوطه‌ور شدند (شکل ۱).

پایان حجم محلول با افزودن آب مقطر به ۱۰۰ میلی لیتر رسید.

$$\Psi_s = - (1.18 \times 10^{-2}) C - (1.18 \times 10^{-4})(C \times 10^4) C^2 + (2.67 \times 10^{-4}) CT + (8.39 \times 10^{-7}) C^2 T$$

در این فرمول Ψ_s ظرفیت اسمزی محلول حاصل بر حسب بار، C غلظت پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ بر حسب گرم در لیتر، و T دما بر حسب درجه سلسیوس است.

آماده سازی بستر رشد

برای رشد بذرهای و بازبینی مراحل رشدی از بسترهای شفاف استفاده شد. محیط‌های رشد (ظرف‌های پلاستیکی در بسته) با استفاده از سدیم هیپوکلریت ۱٪ گندزدایی شد. سپس بسترهای کشت به دقت با آب شسته شدند تا ماده گندزدا به طور کامل از سطح ظرف‌ها پاک شده و باعث ایجاد خطا در آزمایش نشود. در هر ظرف رشد ۶۵۰ گرم خاک با ترکیب خاک با ترکیب خاک جنگل (۲ قسمت)،



شکل ۱- تیمار بذرهای با محلول پلی‌اتیلن گلیکول.

Figure 1- Treatment of seeds with polyethylene glycol solution.

پیشگیری از تبخیر بسته شد و در هفته نخست هر روز به میزان ۱۰۰ میلی لیتر و از هفته دوم به بعد هر دو روز یکبار بذرهای با آب مقطر آبیاری شدند. همه ظرف‌های رشد به اتاقک رشد با شرایط ۲۵ درجه سلسیوس، ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و رطوبت ۴۰٪ منتقل شدند (شکل ۲).

در هر ظرف کشت، دودعد بذر که در محلول‌های نانو خیسانده شده بودند و همچنین تیمار شده با پلی‌اتیلن گلیکول بودند، در گوشه‌های هر ظرف در عمق ۲-۳ سانتی‌متری متری خاک قرار داده شدند و بذر سوم در میان ضلع رو به رو، روی خاک قرار داده شد تا بتوان مراحل تنگی و رشد سیستم ریشه را مشاهده کرد. درب ظرف‌ها برای



شکل ۲- بسترهای رشد حاوی بذرهای تیمار شده در اتاقک رشد.

Figure 2- Growth media contains treated seeds, inside the phytotrone.

ویژگی های مورد پژوهش

ویژگی هایی مثل درصد پیدایش گیاهچه، سرعت تنزگی بذر، وزن تر و خشک ریشه، وزن تر و خشک گیاهچه، طول ریشه، طول گیاهچه، شمار برگ، قطر طوقه، و شمار ریشه های جانبی مورد بررسی قرار گرفتند.

روش های اندازه گیری

شمارش بذرهای تنزیده و ثبت اطلاعات مربوط به طول گیاهچه، طول ریشه چه و شمار برگ ها هر روز تا روز بیست و هشتم انجام شد. دما و رطوبت اتاقک رشد روزی دو مرتبه بررسی شد. روز بیست و هشتم در آغاز به وسیله خط کش با دقت میلی متر طول ریشه و ساقه و سپس با استفاده از کولیس قطر طوقه با دقت ۰/۱ میلی متر اندازه گیری شد. برای اندازه گیری وزن تر ریشه و ساقه از ترازوی با دقت ۰/۱ میلی گرم استفاده شد، در مرحله بعدی ساقه و ریشه به طور جداگانه در پاکت های کاغذی که از پیش آماده شده بود قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار گرفته و خشک شدند. وزن خشک ساقه و ریشه نیز با ترازوی با دقت ۰/۱

میلی گرم اندازه گیری شد. روابط محاسباتی نیز برای شاخص های تنزگی استفاده شد.

واکاوی داده ها

داده های مربوط به هر یک از مراحل آزمایش به طور جداگانه با نرم افزار Excel مرتب و پردازش شد و سپس واکاوی آماری داده ها با نرم افزار SAS JMP نسخه ۱۴.۳.۰ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان می دهد که کاربرد تیمار دی اکسید تیتانیوم در شرایط تنش خشکی بر بیشتر صفات مورد ارزیابی تأثیر معنی داری در سطح ۱٪ داشت.

درصد پیدایش گیاهچه و سرعت تنزگی بذر

نخستین گام از نشانه های زیوایی بذر قوه نامیه و تنزگی و پیدایش گیاهچه است. هر عاملی که بتواند تنزگی بذر را افزایش دهد در دیرپایی گیاه نقش مستقیمی خواهد داشت. نتایج نشان می دهد که کاربرد تیمار تیتانیوم دی اکسید در شرایط تنش خشکی بر بیشتر ویژگی های مورد ارزیابی تأثیر معنی داری داشته است. یافته ها نشان داد که بیشترین درصد تنزگی و پیدایش گیاهچه در غلظت ۵۰

که بهترین سرعت تنژگی به تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو ذره در شرایط بدون تنش خشکی (۱۷ بذر در روز) دیده شد. پژوهشگران دلیل افزایش سرعت تنژگی را رخنه نانو ذره ها به پوسته بذر بیان کرده اند که موجب آسان شدن ورود آب و اکسیژن به درون بذر و در نتیجه تسریع فعالیت آنزیم ها و هیدرولیز مواد ذخیره ای بذر می شود که می تواند اثرهای مفیدی بر فرآیند تنژگی بگذارد (Feizi et al., 2013; Zheng et al., 2005).

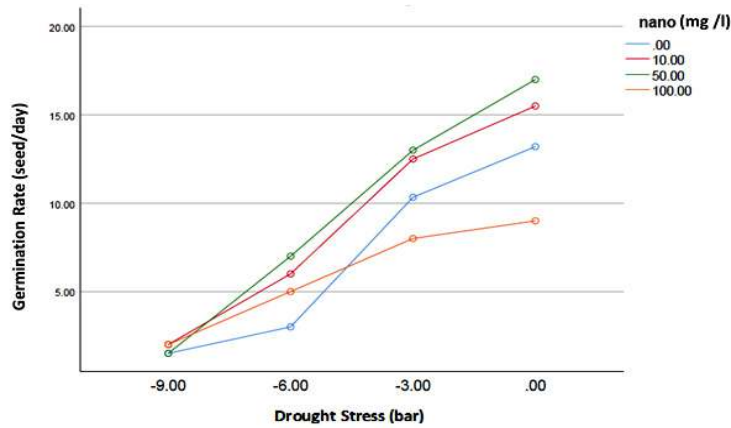
وزن تر و خشک ریشه چه

یافته های این پژوهش نشان داد که در ویژگی وزن ریشه چه تفاوت معنی داری بین تیمارها وجود دارد. در بیشتر تیمارهای تنش خشکی دیده شد که با افزایش سطح تنش خشکی از صفر به ۳- بار میانگین وزن ریشه افزایش یافته است، اما با بالاتر رفتن شدت تنش (۶- و ۹- بار)، وزن ریشه نیز کاهش یافت. به نظر می رسد گیاه بلوت در سطوح آغازین تنش خشکی با افزایش زیست توده کلی ریشه تلاش می کند تا تنش خشکی را تحمل کند اما با افزایش شدت تنش، توانایی برای رویارویی با این تنش محیطی کاهش می یابد. همچنین اکاوی داده ها نشان داد که برهمکنش نانو ذره ها و تنش خشکی در سطح یک درصد معنی دار بود. تیمار نانو ذره با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر با تنش خشکی ۳- بار دارای بیشترین وزن تر ریشه (۷۲۲۸/۳ میلی گرم) و وزن خشک ریشه (۵۶۴۵/۱ میلی گرم) بود. همچنین تیمار نانو ذره با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در تنش خشکی ۹- بار، کمترین وزن تر و وزن خشک ریشه (۱۰۶۲ و ۸۵۳/۸ میلی گرم) را داشت.

میلی گرم در لیتر نانو ذره های تیتانیوم دی اکسید و سطوح صفر و ۳- بار تنش خشکی و کمترین درصد پیدایش در تیمار بدون کاربرد نانو ذره و سطح ۹- بار تنش خشکی به دست آمد (شکل ۳). با کاربرد ۳- بار تنش خشکی بی درنگ سرعت پیدایش کمی افزایش یافت ولی دوباره با افزایش تنش خشکی (۶- بار) سرعت پیدایش کاهش یافت. در سطوح پایین تنش خشکی، اثرگذاری نانو ذره ها بیشتر بود اما با افزایش تنش خشکی به ۶- و ۹- بار، اثرگذاری نانو ذره ها کاهش یافت (شکل ۳). ممکن است در شرایط تنش شدید خشکی نانو ذره ها اثر سمی بر گیاه داشته باشند (Feizi et al., 2012; Nair et al., 2010). سرعت تنژگی بلوت با افزایش سطح تنش خشکی کاهش یافت. بهترین سرعت تنژگی به تیمار شاهد با ۱۳/۲۰ بذر در روز مربوط به تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو ذره بود (شکل ۴) و کمترین سرعت پیدایش در تیمار تنش خشکی سطح ۹- بار با ۱/۵ بذر در روز دیده شد.

در سطوح بالای تنش خشکی، آسیب های احتمالی ناشی از تخریب ساختار سه بعدی آنزیم ها می تواند یکی از دلایل اصلی کاهش سرعت تنژگی باشد. در تأیید پژوهش حاضر نتایج حاصل از بررسی اثر تنش آبی ناشی از پلی اتیلن گلیکول بر ویژگی های تنژگی بذر گیاه سرخارگل نشان داد که با کاهش پتانسیل آب و ایجاد تنش خشکی، سرعت و درصد تنژگی، وزن تر و خشک و طول ساقه چه و ریشه چه کاهش یافت (Asghari et al., 2010).

همچنین در مقایسه بین سطوح مختلف نانو ذره ها با یکدیگر دیده شد که غلظت های پایین نسبت به غلظت های بالاتر اثر مثبت کمتری بر سرعت تنژگی داشتند. به طوری



شکل ۳- میانگین تغییرات سرعت تنزگی بذر با کاربرد تیمارهای نانوذره (۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و تنش های خشکی (۰، -۳، -۶، -۹ بار).

Figure 3- Mean of germination rate of seedlings after treatment by nanoparticles (0, 10, 50, 100 mg L⁻¹) and drought stress (0, -3, -6, -9 bar).



شکل ۴- تنزگی و رویش گیاهچه بلوت پس از کاربرد نانوذره (۵۰ میلی گرم در لیتر) و تنش خشکی (۳- بار).

Figure 4 - Germination and emergence of oak seedling after treatment with nanoparticles (50 mg L⁻¹) and drought stress (-3 bar).

تیمار نانوذره ها همراه با تنش خشکی به کار رفت گیاه آستانه تحمل تنش خود برای بقای بهتر در شرایط تنش را افزایش داد. غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوذره ها در سطح تنش خشکی ۳- بار با ۱۲۷/۳۳ میلی متر بیشترین میانگین طول ریشه را ایجاد کرد (شکل های ۵ و ۶) و همین غلظت نانوذره ها در سطح تنش خشکی ۶- بار، دارای طول ریشه برابر ۹۶/۲ میلی متر بود که به ترتیب ۷۶/۷۳ میلی متر و

طول ریشه

یافته ها نشان داد که تنش خشکی به تنهایی می تواند در سطوح پایین عاملی برای افزایش طول ریشه برای دستیابی به آب بیشتر باشد اما پس از کاربرد سطوح بالاتر تنش خشکی گیاه برای بقا خود واکنش محافظتی انجام می دهد و تلاش در حفظ موجودیت خود دارد تا گسترش و یا افزایش شمار یاخته ها حتی در ناحیه ریشه. اما زمانی که

و مجموع سطح ریشه‌ها دارای اهمیت است. به عبارت دیگر بین ساخته شدن هیدرات‌های کربن توسط برگ‌ها و جذب آب و مواد کانی به وسیله ریشه باید توازنی حفظ شود. بنابراین توازن بین ریشه و شاخساره رابطه‌ای است که مربوط به کنش‌های درونی و تامین نیازهای زیستی گیاه است. طوقه پل ارتباطی ریشه و ساقه است. در این ناحیه، مسیر دسته‌های آوندی ریشه تغییر کرده و با دسته‌های آوندی ساقه، ارتباط پیدا می‌کند. بنابراین تغییر در قطر این ناحیه می‌تواند میزان تبادل های گیاه را زیر تاثیر قرار دهد. یافته‌ها نشان داد که برهمکنش بین تیمار نانوذره‌ها و تنش خشکی بر تغییرهای قطر طوقه در سطح یک درصد معنی‌دار بود (شکل ۷). غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره‌ها و سطح ۶- بار تنش خشکی، با ۶/۳۳ میلی‌متر بیشترین میانگین قطر طوقه را داشت (شکل ۸) و نسبت به تیمار شاهد، قطر طوقه به‌طور میانگین ۲/۶۳ میلی‌متر افزایش داشت.

ریشه‌های جانبی

هر چه سطح ریشه بیشتر باشد آب و مواد معدنی بیشتری از خاک جذب می‌شود و توان استقرار گیاه در شرایط تنش خشکی افزایش خواهد یافت. بنابراین ایجاد ریشه‌های جانبی و موین در کنار ریشه‌های اصلی می‌تواند از عوامل مهم پایداری و بقا گیاه بلوت در شرایط تنش خشکی باشد. واکاوی یافته‌ها نشان داد که بیشترین شمار ریشه‌های جانبی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره‌ها و سطح ۳- بار تنش خشکی و کمترین شمار در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره‌ها و سطح ۹- بار تنش خشکی می‌باشد. همچنین کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره در سطح تنش ۳- بار سبب ایجاد شماری ریشه‌های موین شد، درحالی که در غلظت صفر از نانوذره‌ها و سطح ۹- بار تنش خشکی کمترین شمار ریشه‌های موین دیده شد (شکل ۹).

۴۵/۶ میلی‌متر بیشتر از شاهد (۵۰/۶ میلی‌متر) رشد طولی ریشه داشتند (شکل ۵). بذرهایی که بتوانند در مرحله تنزگی واکنش مناسبی به تنش خشکی نشان دهند، در مرحله گیاهچه‌ای رشد بهتری داشته و سیستم ریشه‌ای قوی‌تری تولید می‌کنند.

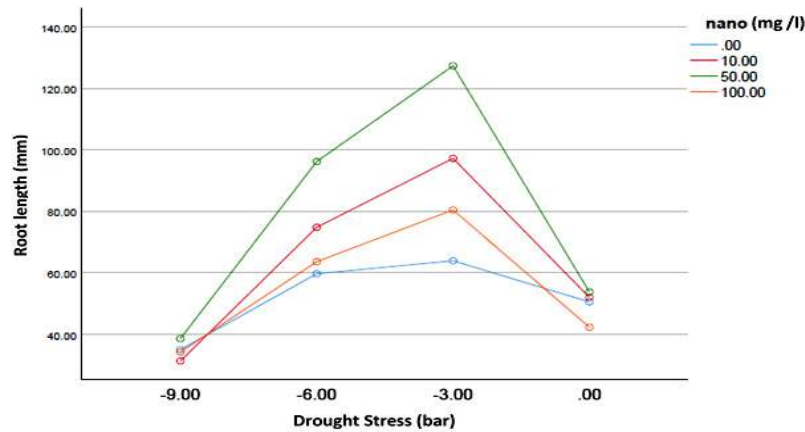
یافته‌های پژوهشگران دیگر نشان داده است که غلظت‌های پایین از نانوذره‌های تیتانیوم باعث تنش اکسیداتیو قابل ملاحظه‌ای در یاخته گیاهی نخواهد شد (Sing et al., 2012; Larue et al., 2012). پس از نفوذپذیر شدن پوسته‌ی بذر، ریشه‌چه‌ها به طور مستقیم در برابر تماس با نانوذره‌ها قرار می‌گیرند و نخستین بافت هدف در رویارویی با غلظت‌های نانوذره‌ها هستند، در نتیجه اثر نانوذره‌ها بیشتر در ریشه‌چه‌ها مشخص می‌شود (Sresty and Rao., 1999).

طول ساقه‌چه و شمار برگ

واکاوی یافته‌ها نشان داد که تنش خشکی تغییر معنی‌داری در طول ساقه‌چه ایجاد نکرد اما در سطوح بالای تنش خشکی شمار برگ‌ها و اندازه سطح برگ‌ها کاهش نشان داد. واکاوی تیمارها نشان داد که بیشترین شمار برگ در غلظت ۱۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره و بدون تنش خشکی به دست آمد (۶ برگ). تنش‌های شدید خشکی بر شمار برگ‌ها اثر منفی داشت. اگرچه بین تیمارهای نانوذره‌ها اختلاف آماری معنی‌داری در طول ساقه‌چه و شمار برگ‌ها وجود نداشت اما تیمار ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذره‌ها مقدار عددی بیشتری نسبت به دیگر تیمارها داشت. به‌طوری که طول ساقه‌چه در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذره و بدون تنش خشکی، نسبت به تیمار شاهد ۱۰/۱۱ میلی‌متر افزایش نشان داد.

قطر طوقه

در هر گیاه، بین مقدار ریشه و ساقه و برگ‌ها باید توازنی برقرار باشد. این توازن به ویژه از نظر مجموع سطح برگ



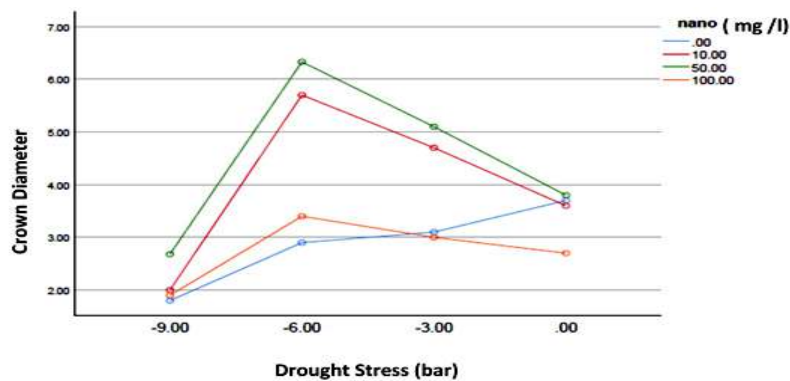
شکل ۵- میانگین تغییرات طول ریشه با کاربرد تیمارهای نانوذره (۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و تنش‌های خشکی (۰، -۳، -۶، -۹ بار).

Figure 5 – Mean of differences in root length after treatment by nanoparticles (0, 10, 50, 100 mg L⁻¹) and drought stress (0, -3, -6, -9 bar).



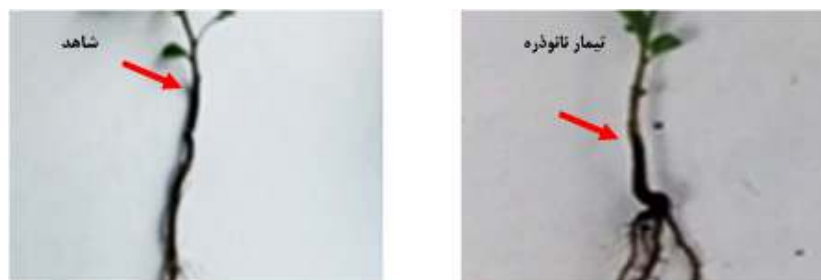
شکل ۶- اثر نانوذره‌ها و تنش خشکی بر طول ریشه (غلظت نانوذره ۵۰ میلی گرم در لیتر و تنش خشکی -۳ بار).

Figure 6 - Interaction of nanoparticles and drought stress on root length (nanoparticle concentration of 50 mg L⁻¹ and drought stress of -3 bar).



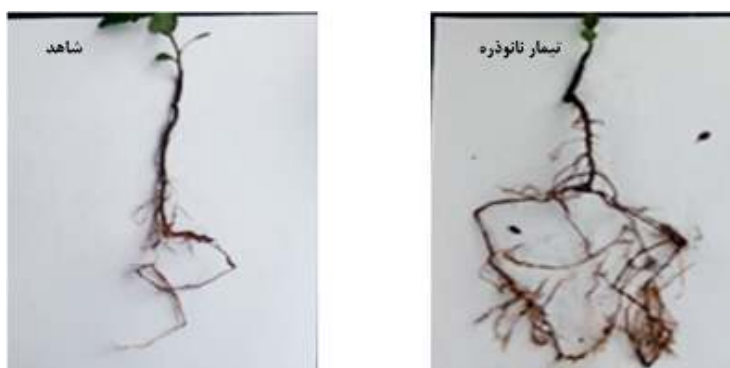
شکل ۷- میانگین تغییرات قطر طوقه با کاربرد تیمارهای نانوذره (۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) و تنش‌های خشکی (۰، -۳، -۶، -۹ بار).

Figure 7 – Mean of differences in crown diameter after treatment by nanoparticles (0, 10, 50, 100 mg L⁻¹) and drought stress (0, -3, -6, -9 bar).



شکل ۸- اثر نانوذره ها و تنش خشکی بر قطر طوقه (غلظت نانوذره ۵۰ میلی گرم در لیتر و تنش خشکی ۶- بار).

Figure 8 - Interaction of nanoparticles and drought stress on crown diameter (nanoparticle concentration of 50 mg L^{-1} and drought stress of -6 bar).



شکل ۹- ایجاد ریشه های جانبی و موین تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوذره ها و تنش خشکی ۳-بار.

Figure 9- Production of lateral and fibrous roots in 50 mg L^{-1} nanoparticles and -3 bar drought stress .

بلوت با نانوذره های تیتانیوم دی اکسید موجب افزایش $10/85$ درصدی طول ریشه و همچنین افزایش $18/18$ درصدی طول ساقه نسبت به شاهد شد. بذرها خیسانده شده کتان در تعلیق های نانوذره های تیتانیوم دی اکسید در غلظت 100 میلی گرم در لیتر اثرهای مثبتی بر تنگی بذر و رشد ریشه داشت (Clement *et al.*, 2012). این اثرهای مثبت می تواند به دلیل ویژگی های ضد میکروبی ساختار کریستالی آناتاز تیتانیوم دی اکسید باشد که تحمل گیاه را در برابر تنش ها افزایش می دهد (Clement *et al.*, 2012). پژوهش ها نشان داده است که روش کاربرد تیتانیوم بر رشد اثرهای متفاوتی دارد. پژوهشگران دریافته اند که اثر کاربرد تیتانیوم در محلول غذایی بر رشد مؤثرتر از تیمار آن بر برگ بود (Kuzel *et al.*, 2003) همچنین گروه دیگر از

یافته ها نشان داد که تیمار بذرها با نانوذره های تیتانیوم دی اکسید موجب بهبود رشد ریشه و استقرار بهتر بذور شد. نانوتیتانیوم دی اکسید باعث افزایش قدرت و استحکام ریشه و افزایش توانایی ریشه در جذب آب و کود و افزایش فعالیت نترات ردوکتاز می شود و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی مثل سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز را افزایش می دهد (Lu *et al.*, 2002). دلیل عمده افزایش سرعت رشد گیاه در واکنش به نانوذره های تیتانیوم دی اکسید تولید نوری اکسیژن فعال است که تحمل بذر را به تنش افزایش داده و رخنه آب و اکسیژن را بهبود و در نتیجه سرعت تنگی را افزایش می بخشد (Khot *et al.*, 2012). زیر تنش خشکی، تیمار بذر که موجب افزایش رشد و سطح ریشه چه گردد از اهمیت بیشتری برخوردار است. تیمار بذرها

نتیجه گیری

به طور کلی نتایج آزمایش حاضر نشان داد که گیاه بلوت خشکی را تا ۳- بار تحمل نمود اما افزایش شدت تنش بر شاخص‌های تنژگی این گیاه اثر منفی گذاشت. تیمار ۵۰ میلی گرم در لیتر نانوذره ها توانستند به تحمل گیاه در برابر تنش خشکی تا سطح تنش ۶- بار کمک کرده و شاخص‌های تنژگی بلوت را نسبت به شاهد در شرایط تنش خشکی بهبود بخشند. بنابراین می‌توان تیمار گفته شده را برای بهبود رشد گیاه بلوت در مناطقی که با تنش خشکی رو به رو هستند پیشنهاد نمود. پژوهش حاضر نخستین پژوهش انجام شده تیمار نانو ذره بر ویژگی‌های رویشی بذر سخت و چوبی بلوت است. یافته‌های حاصل در شرایط گلخانه به دست آمده است و برای آگاهی از واکنش گیاه به نانوذره ها در شرایط تنش خشکی در عرصه‌های طبیعی لازم است که همانند این آزمایش در شرایط طبیعی و محیط جنگل و نهالستان‌ها آزمایش‌هایی انجام شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در احیا و بازسازی جنگل‌های بلوت از دست رفته، و همچنین داشتن بذرهایی با توانمندی بالا برای ایجاد درختانی تنومند با برگ‌های فراوان برای پالایش هوا، کنترل فرسایش خاک و سایه افکنی و ایجاد فضای سبز نقش داشته باشد.

پژوهشگران نشان دادند که محلول پاشی این عنصر روی برگ‌های فلفل اثر بیشتری بر رشد داشت (Martines-Sunchez et al. 1993). پاشیدن نانوذره های تیتانیوم به ویژه با غلظت‌های کم (۲۰ و ۴۰ قسمت در میلیون) روی اندام هوایی نهال‌های گلابی وحشی از راه تبادل های گازی و افزایش آنزیم‌های آنتی اکسیدانی، باعث کاهش اثرهای مخرب تنش خشکی شد. با کاربرد تنش خشکی در سطح ۳- بار بیشتر ویژگی‌های تنژگی بذر بلوت کاهش یافت ولی با افزایش میزان تنش خشکی به سطح ۶- بار دوباره بهبود در این ویژگی‌ها دیده شد و بهترین عملکردها در تنش خشکی در سطح ۶- بار بود و با افزایش سطح خشکی به ۹- بار عملکردها کاهش یافتند و گاهی حتی از عملکرد تیمار شاهد نیز کمتر بود که این بیانگر نیمه حساس بودن بلوت به تنش خشکی می‌باشد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۵) عنوان کردند که دلیل عمده افزایش سرعت تنژگی با استفاده از نانوذره های تیتانیوم دی‌اکسید رخنه سریع آن‌ها به واسطه اندازه بسیار ریز، به پوسته بذر است که باعث آسانی ورود آب و اکسیژن به درون یاخته شده بنابراین متابولیسم تنژگی بذر را تشدید می‌نماید. با توجه به نتایج، بهترین تیمار بذری ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از نانوذره های تیتانیوم دی‌اکسید بود، که در واقع نانوذره های تیتانیوم در این غلظت موجب بهبود رشد و استقرار بلوت در خاک‌های زیر تنش خشکی می‌شود.

منابع

- Ahmadi, E., Kowsari, M., Azadfar, D., Salehi Jouzani, G.R. (2019). *Bacillus pumilus* and *Stenotrophomonas maltophilia* as two potentially causative agents involved in Persian oak decline in Zagros forests (Iran). *Forest Pathology*, 49, 1-16.
- Alidadi, A., Kowsari, M., Javan-Nikkhah, M., Karami, S., Ariyawansa, H.A., Salehi Jouzani, G.R. (2019). *Deniquelata quercina* sp. nov.; a new endophyte species from Persian oak in Iran. *Phytotaxa*, 405, 187-194.

- Alidadi, A., Kowsari, M., Javan-Nikkhah, M., Salehi Jouzani, G.R., Ebrahimi Rastaghi, M. (2019). New pathogenic and endophytic fungal species associated with Persian oak in Iran. *European Journal of Plant Pathology*, 155, 1017-1032.
- Asghari, F., Drajshani, Z., Delkani, M. (2010). Effect of water stress derived of PEG on germination properties of Cone Flower *Echinacea purpurea* (L.). Proceeding of Articles 6th Iranian Congress of Horticultural Sciences 13-16 July, Gilan, Iran.
- Ashley, M.V., Backs, J.R, Kindsvater, L., Abraham, S.T. (2018). Genetic variation and structure in an endemic island oak, *Quercus tomentella* and mainland canyon oak, *Quercus chrysolepis*. *International Journal of Plant Sciences*, 179, 151–161.
- Bigler, Ch., Ulrich Braker, O., Bugmann, H., Dobbertin, M. Rigling, A. (2006). Drought as an Inciting Mortality Factor in Scots Pine Stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*, 9, 330-343.
- Boykov, I. N., Shuford, E., Zhang, B. (2019). Nanoparticle titanium dioxide affects the growth and micro RNA expression of switchgrass (*Panicum virgatum*). *Genomics*, 111, 450-456.
- Clement, L., Hurel, C., Marmier, N. (2012). Toxicity of TiO₂ nanoparticles to cladocerans, algae, rotifers and plants- Effects of size and crystalline structure. *Chemosphere*, 90, 1083-1090.
- Feizi, H., Rezvanimoghaddam, P., Fotovat, A., Shahtahmasebi, N. (2012). Impact of Bulk and Nanosized Titanium Dioxide (TiO₂) on Wheat Seed Germination and Seedling Growth. *Biological Trace Element Research*, 146, 101–106.
- Hipp, A., Manos, P., Cavender-Bares, J. (2020). Ascent of the Oaks: How they evolved to rule the forests of the Northern Hemisphere. *Scientific American*.
- Hong, F., Zhou, J., Liu, C., Yang, F., Wu, C., Zheng, L., Yang, P. (2005). Effects of Nano Tio₂ on photochemical reaction of chloroplasts of Spinach. *Biological Trace Element Research*, 105, 269-279.
- Hosseinzadeh, J., Aazami, A., Mohammadpour, M. (2015). Influence of topography on Brant's oak decline in Meleh- Siah Forest, Ilam Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 23, 190-197. (In Persian).
- Jenkins, M.A., Pallardy, S.G. (1995). The influence of drought on red oak group species growth and mortality in the Missouri Ozarks. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 1119-1127.
- Khote, LR., Sankaran, S., Mari, J., Schuster, E.W. (2012). Applications of nanomaterials in agriculture production and crop protection; A review. *Crop Protection*, 35, 64-70.
- Kremer, A., Hipp, A.L. (2019). Oaks: An evolutionary success story. *New Phytologist*, 226, 987-1011.
- Kuzel, S., Hruby, M., Cigler, P., Tlustos, P., Van, P.N. (2003). Mechanism of physiological effects of titanium leaf sprays on plants grown on soil. *Journal of Biological Trace Element Research*, 91, 179-190.
- Larue, C., Laurette, J., Herlin-Boime N., Khodja H., Fayad B.F., Lank, A.M., Brisset, F., Carriere, M. (2012). Accumulation, translocation and impact of TiO₂ nanoparticles in wheat *Triticum aestivum* ssp.; influence of diameter and crystal phase. *Science of the Total Environment* 431, 197-208.
- Lu, C.M., Zhang, C.Y., Wu, J.Q., Tao, M.X. (2002). Reasearch of the effect of nanometer on germination and growth enhancement of Glycine max and its mechanism. *Soybean Science*, 21, 168-172.
- Ma, M., Geiser, L., Deng, Y., Kolmakov, A. (2010). Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants; Phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*, 408, 3053-3061.
- Maleknia, R., Namirani, M., Fegghi, J. (2006). Investigation on the effective factors in agricultural lands selection in zagros forest and their influence on forest stands status (Case study; cheshmeh khazaneh rural boundary Ilam). *Forest & Rangeland*, 71, 22-25 (In Persian).
- Malik, C.P., Gupta, K., Sharma, S. (1986). Effect of water stress on germination and seedling metabolism of gram

- (*Cicer arietinum* L.). *Acta Agronomica Hungarica*, 35, 11-16.
- Martinez-Sanchez, F., Nunez, M., Amoros, A., Gimenez, J.L., Alcarez, C.F. (1993). Effect of titanium leaf spray treatments on ascorbic acid levels of *Capsicum annum* L. Fruits. *Journal Plant Nutrition*, 16, 975-981.
- Mingyu, S., Hong, F., Liu, C., Wu, X., Liu, X., Chen, L. (2007). Effects of nano-anatase TiO₂ on absorption, distribution of light and photo reduction activities of chloroplast membrane of spinach, *Biological Trace Element Research*, 118, 120-130.
- Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T., Yoshida, Y., Sakthi Kumar, D. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179, 154-163.
- Paris, I. (1983). The biological importance of titanium. *Journal of Plant Nutrition*, 6, 3-131.
- Safarnejd, A. (2004). Characterization of somaclones of *Medicago sativa* L. for drought tolerance. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 6, 121-127.
- Rop, K., Karuku, G.N., Mbui, D., Njomo, N., Michira, I. (2019). Evaluating the effects of formulated nano-NPK slow release fertilizer composite on the performance and yield of maize, kale and capsicum. *Annals of Agricultural Science*, 64, 9-19.
- Scrinis G., Lyons, K. (2007). The emerging nano corporate paradigm; Nanotechnology and the transformation of nature, food and Agri food systems. *International Journal of Sociology of food and Agriculture*, 15, 22-44.
- Shabala, S., Babourina, O., Newman, I. (2000). Ion-specific mechanisms of osmoregulation in bean mesophyll cells. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1243-1253.
- Sharma, V.K., Yngard R.A., Lin, Y. (2009). Silver nanoparticles; green synthesis and their antimicrobial activities, A dv. *Journal of Colloid and Interface Science*, 145, 83-96.
- Singh, D., Kumar, S., Singh, S.C., Lal, B., Singh, N.B. (2012). Applications of liquid assisted pulsed laser ablation synthesized TiO₂ nanoparticles on germination, growth and biochemical parameters of *Brassica oleracea* var. *Capitata*. *Science of Advanced Materials*, 4, 522-531.
- Singh, J., Lee, B.K. (2016). Influence of nano-TiO₂ particles on the bioaccumulation of Cd in soybean plants (*Glycine max*): A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 170, 88-96.
- Sresty, T.V.S., Rao, K.V.M. (1999). Ultrastructural alteration in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeonpea. *Environmental and Experimental Botany*, 41, 3-13.
- Tiwari, E., Mondal, M., Singh, N., Khandelwal, N., Monikh, F.A., Darbha, G.K. (2020). Effect of the irrigation water type and other environmental parameters on CeO₂ nanopesticide-clay colloid interactions. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22, 84-94.
- Xu, N., Li, Z., Huangfu, X., Cheng, X., Christodoulatos, C., Qian, J., Chen, M., Chen, J., Su, C., Wang, D. (2020). Facilitated transport of nTiO₂-kaolin aggregates by bacteria and phosphate in water-saturated quartz sand. *Science of the Total Environment*, 713, 136589.
- Zhang, L., Hong, F., Lu, S., Liu, S., Liu, C. (2005). Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of Spinach. *Biological Trace Element Research*, 105, 83-91.

Effects of titanium dioxide nanoparticles on germination and growth indices of oak acorns under drought stress

Maryam Heshmati^{1,2}, Mozhgan Kowsari^{2*}, Hassan Feizi¹

1. Department of Plant Production, University of Torbat Heydarieh, Iran

2. Microbial Biotechnology Department, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII),
Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

✉ * kowsari@abrii.ac.ir

Abstract

The crisis of oak decline in recent years has destroyed big sections of the Zagros forests, and altering the structure of the forest masses. Finding ways to restore deforested forests and increase the ability to deploy new seedlings in the field can help reforest. In this study, the potential of titanium dioxide nanoparticles was used to modify the damaging effects of drought stress on oak seed. Drought stress is one of the most important factors in limiting the seed germination of plants. Treatments consisted of 4 levels of titanium nanoparticles (0, 10, 50 and 100 mg L⁻¹) and 4 levels of drought stress (0, -3, -6 and -9 bar) applied by polyethylene glycol 6000. Zero levels in both treatments were considered as the control treatment. The experiment was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with two factors and three replications. Analysis of variance showed that drought stress had a negative effect on most growth factors, especially at high levels. Drought stress above -6 bar, had a negative effect on root growth and treatment of 50 mg L⁻¹ titanium dioxide with -2 bar of drought stress caused the highest root fresh weight (7228.3 mg) and maximum root length of 127.33 mm. High drought stress levels decreased leaf number and leaf area. Although there were no significant differences between the treatments of nanoparticles on stem length and number of leaves, treatment with 50 mg L⁻¹ nanoparticles had higher numerical value than others. The results showed that the highest germination percentage and seedling emergence were obtained at the concentration of 50 mg L⁻¹ of TiO₂ and drought stress in 0 and -3 bar, and the lowest germination percentage was observed at no-treatment and drought stress in -9 bar. The interactions between nanoparticles and drought stress at the 1% level were significant for the crown diameter changes. The concentration of 50 mg L⁻¹ nanoparticles at the drought stress in -6 bar, increased the crown diameter by about 2.63 mm on average. The highest number of lateral roots was obtained at a concentration of 50 mg L⁻¹ and a -3 bar of drought stress. The results showed that when the nanoparticles were treated with drought stress, the plant increased its stress tolerance threshold for better survival under stress conditions. Based on the findings of this study, it can be concluded that a concentration of 50 mg L⁻¹ nanoparticles is the most suitable treatment for improving root characteristics and moderating drought stress effect on oak. The present study is the first study of nanoparticle treatment on vegetative characteristics of oak seed.

Keywords: Oak decline, Drought stress, Titanium dioxide, Forest.