

## اثر نانو ذرات سیلیکا (SiO<sub>2</sub> NPs) بر صفات مرفوفیزیولوژی نهال‌های کاج سیاه (*Pinus nigra*) تحت تنش خشکی

سودا دهقان<sup>۱\*</sup>، مسعود طبری کوچکسرای<sup>۲</sup> و غلامعلی جلالی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۲- استاد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۳- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۲۷

### چکیده

بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای تعدیل اثرهای تخریبی خشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، از خصوصیات منحصربه‌فرد نانو ذرات سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) به منظور کاهش اثر تنش کم‌آبی، روی کاج سیاه (*Pinus nigra*) استفاده شد. برای تعدیل اثرهای مخرب تنش خشکی بر نهال‌هایی که بر اساس ظرفیت زراعی خاک هر چهار، شش و هشت روز یک‌بار آبیاری می‌شدند به‌طور جداگانه از سوسپانسیون-های نانو ذرات سیلیکا با غلظت‌های صفر، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم استفاده شد طوری که هر هفته یک‌بار به مدت پنج ماه بر برگ‌های هر نهال اسپری شد. اعمال نانو ذرات سیلیکا سبب افزایش رویش ارتفاعی، پتانسیل آبی، محتوای نسبی رطوبت و کاهش نشت الکترولیت در نهال‌های تحت تنش شد و افزایش غلظت آن سبب افزایش وزن خشک اندام هوایی و طول ریشه نهال‌های تحت تنش خشکی شد. در مجموع می‌توان بیان داشت که استفاده از نانو ذرات سیلیکا به‌ویژه، غلظت‌های ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، موجب بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیک و افزایش زی‌توده کل در نهال‌های کاج سیاه تحت تنش خشکی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آبی، تنش کم‌آبی، کاج سیاه، نشت الکترولیت، نانو سیلیکا.

سیلیکا ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) در برگ انباشته می‌شود (Schaller *et al.*, 2013). سیلیکا هنوز به‌عنوان یک ماده مغذی ضروری برای رشد گیاه شناخته‌نشده است، درحالی‌که اثرهای مفید آن مانند ازدیاد رشد، عملکرد و افزایش مقاومت در برابر تنش‌های زنده و غیر زنده در طیف گسترده‌ای از گونه‌های گیاهی به اثبات رسیده است (Pei *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Siddiqui and Al-Wahaibi, 2013).

در سال‌های اخیر، اثرهای نانو ذرات سیلیکا بر گیاه در مقیاس نانو مورد توجه قرار گرفته است که البته پژوهش‌های محدودی در این رابطه وجود دارد. پژوهش Yuvakkumar و همکاران (2011) بر گیاه ذرت در مدت ۶۵ روز نشان داد که اعمال نانو ذرات سیلیکا به‌صورت پودر و مخلوط با خاک گلدان‌ها موجب افزایش درصد جوانه‌زنی (۲ تا ۱۱ درصد)، ضریب بهره‌وری آب (بیشتر از ۵۳ درصد) و مقدار کلروفیل (۱۳ تا ۱۷ درصد) شد. همچنین، تمامی شاخص‌های کمی گیاه نسبت به تیمار کنترل و تیمار سیلیکون درشت‌دانه افزایش یافت. Haghghi و همکاران (2012) با اعمال نانو ذرات سیلیکا بر بذر گیاه گوجه‌فرنگی تحت تنش شوری و بررسی آن در مدت‌زمان ۱۰ روز به این نتیجه رسیدند که نانو ذرات سیلیکا می‌تواند اثرهای منفی و مخرب شوری بر درصد جوانه‌زنی و طول و وزن ریشه را بهبود بخشد. همچنین، Bao-shan و همکاران (2004) با خیساندن ریشه نهال‌های یک‌ساله لاریکس (*Larix olgensis*) به مدت شش ساعت در غلظت‌های ۶۲، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات سیلیکا دریافتند که تا حد زیادی تیمارهای نانو ذرات سیلیکا روی افزایش رشد و کیفیت نهال‌ها اثر گذاشتند. تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر بهترین نتیجه را داد و در مقایسه با تیمار شاهد، میانگین ارتفاع، قطر

خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌هایی است که در دنیا وجود دارد و زمانی که اندازه تبخیر و تعرق از جذب آب بیشتر شود در گیاهان به وقوع می‌پیوندد. نقاط مختلفی از جهان در معرض تنش خشکی قرار دارند به‌طوری‌که می‌توان اذعان داشت که ۲۶ درصد از مناطق قابل استفاده کره زمین تحت تأثیر خشکی قرار می‌گیرند (Blum and Sullivan, 1986). خشکی را می‌توان نتیجه بارندگی کم، دمای زیاد و وزش باد عنوان کرد که البته واکنش گیاه به آن بسته به مراحل فیزیولوژیک متفاوت است (Magrokosho and Pixley, 1995). تنش خشکی به‌عنوان شایع‌ترین تنش غیرزیستی که گیاهان با آن مواجه هستند مطرح است و با توجه به تغییرات رژیم‌های بارندگی و کاهش مقدار بارش‌ها، شناسایی و معرفی ارقام متحمل به خشکی بسیار ارزشمند است (Golparyar *et al.*, 2006). تنش خشکی بیشتر از هر عامل محیطی دیگری رشد گیاهان را محدود می‌کند (Huang, 2000). گونه‌های مختلف گیاهی دامنه وسیعی از مکانیسم‌های مقاومت به خشکی را نشان می‌دهند که منجر به سازگاری‌های آناتومیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می‌شود (Arji and Arzani, 2003).

سیلیکا پس از اکسیژن، فراوان‌ترین عنصر در خاک است. سیلیس ۵۰ تا ۷۰ درصد وزن خاک را تشکیل می‌دهد (Ma and Yamaji, 2006). اگرچه سیلیکا به‌طور معمول کمتر در دسترس گیاه است اما در محلول خاک به‌صورت سیلیس حل شده با مونوسیلیسیک اسید ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) وجود دارد و با همین فرم توسط گیاهان جذب می‌شود (Bandani and Abdolzadeh, 2007; Schaller *et al.*, 2013). در ریشه گیاه تبدیل به سالیسیک اسید ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) شده و به دلیل شرکت در جریان تعرق به‌صورت ژل

یقه ریشه، میانگین طول ریشه و تعداد ریشه‌های فرعی به ترتیب ۳۱/۶، ۱۴/۰، ۳۰/۷ و ۴۲/۵ درصد افزایش یافتند.

در این پژوهش اثر نانو ذرات سیلیکا روی شاخص‌های رویشی و فیزیولوژی نهال‌های کاج سیاه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شایان ذکر است کاج سیاه از گونه‌هایی است که توده‌های خالصی ایجاد می‌کند و کمتر به صورت آمیخته با دیگر گونه‌ها دیده می‌شود. با توجه به تنوع اکولوژیکی زیرگونه‌ها و واریته‌های آن، مهم‌ترین گونه برای جنگلکاری در زمین‌های خشک و صخره‌ای مناطق نیمه مدیترانه‌ای بوده و تقریباً به خوبی در بیشتر رویشگاه‌های مناسب مستقر می‌شود (Zare, 2001). در کل، پاسخ به سؤالات ذیل نظر این تحقیق بوده است:

۱- نانو ذرات سیلیکا چه تأثیری روی فرآیندهای رویشی و فیزیولوژی نهال کاج سیاه دارد؟

**مواد و روش‌ها**

در این پژوهش بذور کاج سیاه (*Pinus nigra* Arnold) (با مشخصات آمده در جدول ۱) در نهالستان لاجیم واقع در شهرستان سوادکوه استان مازندران کاشته شدند. آنگاه در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۳، ۱۸۰ نهال ریشه لخت یک‌ساله همگن (از نظر قطر و ارتفاع) به همراه خاک نهالستان به گلخانه دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس واقع در شهرستان نور - استان مازندران منتقل شد و در گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و پهنای ۱۵ سانتی‌متر باز کاشت شدند. شرایط گلخانه تحقیقاتی شامل دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۲۳ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۳۵ درصد و شدت نور ۱۵۰۰ لوکس (در ساعت ۱۳) بوده است.

جدول ۱- مشخصات بذر مورد استفاده در تحقیق

Table 1. Characteristics of the seeds used in the current study

مشخصات	بذر کاج سیاه
Characteristics	<i>Pinus nigra</i> seed
گرگان	منشأ بذر
Gorgan	Seed origin
1500	ارتفاع از سطح دریا (متر)
Height above sea level (m)	
53892	تعداد در کیلوگرم
Number of seeds/ kg	
100	درصد خلوص
Purity (%)	
6.8	رطوبت نسبی بذر
Relative humidity of seed (%)	
81	قوه نامیه
Viability (%)	

شامل برگ‌های جوان‌تر بود، به وزن ۱۰۰ میلی‌گرم برش داده شد و بلافاصله توزین و به لوله‌های آزمایش درب‌دار وارد شدند و بعد از ۶ ساعت وزن آماس برگ‌ها تعیین شد. سپس برگ‌ها به داخل آون با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شده و بعد از ۴۸ ساعت وزن خشک بر وزن رطوبت نسبی برگ‌ها با استفاده از رابطه زیر به دست آمد.

$$RWC = \frac{FW - DW}{SW - DW} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه FW: وزن تر برگ‌ها، DW: وزن خشک برگ‌ها، WS: وزن آماس برگ‌ها است (Martinez., 2007).

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت یک برگ از هر نهال به‌طور تصادفی انتخاب شد. سپس برگ نهال با استفاده از تیغ به تکه‌های مساوی تقسیم شد و پس از آبکشی توسط آب مقطر، در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر در ظروف فالکون به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد. پس از ۲۴ ساعت هدایت الکترولیت‌ها با استفاده از یک دستگاه هدایت سنج (EC متر) اندازه‌گیری و به‌عنوان هدایت الکتریکی ۲۴ (EC ۲۴) ثبت شد. سپس نمونه‌ها در حمام آب گرم با دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت جوشانده شدند و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای اتاق، هدایت الکترولیت‌ها دوباره اندازه‌گیری شد و حداکثر هدایت الکتریکی (EC Max) از این طریق ثبت شد. نسبت هدایت الکتریکی ۲۴ ساعته به حداکثر برحسب درصد به‌عنوان شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شد (Campos et al., 2009).

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها

بعد از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها برای سازمان‌دهی وارد نرم‌افزار Excel شدند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با مدل خطی (GLM) و با نرم‌افزار SPSS نسخه 16 انجام شد. قبل از آنالیز داده‌ها به‌منظور آزمون نرمال

برای ارزیابی اثرهای نانوذرات بر گیاه، از روش اسپری روی برگ و اندام هوایی (Zhang et al., 2013) استفاده شد. در این تحقیق نانوذره سیلیکا (SiO<sub>2</sub> NPs) (شرکت Tecnan، اسپانیا) مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب سوسپانسیون‌هایی با غلظت‌های صفر، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ (میلی‌گرم بر لیتر) هر هفته یکبار بر برگ‌های هر نهال اسپری شد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک-های کاملاً تصادفی با چهار سطح نانو ذرات و تیمار شاهد، سه سطح آبیاری (چهار، شش و هشت روز) و سه تکرار (در هر تکرار چهار نهال) انجام شد. همچنین این پژوهش از اواخر اردیبهشت‌ماه تا ابتدای ماه مهر ۱۳۹۳ ادامه داشت.

در این تحقیق در ابتدا و انتهای دوره آزمایش، شاخص‌های مورفولوژی مانند قطر و ارتفاع نهال‌ها اندازه‌گیری شدند. قطر، با استفاده از کولیس دیجیتالی و با دقت یک‌صدم میلی‌متر و ارتفاع با استفاده از خط-کش تا دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شد. از تفاضل ارتفاع و قطر در انتها و ابتدای دوره به ترتیب رویش ارتفاعی و رویش قطری به‌دست آمد. همچنین در انتهای آزمایش، از هر تکرار یک نهال از خاک خارج و پس از شستشوی خاک اطراف ریشه، طول ریشه و حجم ریشه اندازه‌گیری شد. طول ریشه با استفاده از خط-کش تا دقت دسی‌متر و حجم ریشه با استفاده از لوله مدرج (افزایش حجم آب در لوله مدرج) اندازه‌گیری شد. در پایان دوره از هر تکرار یک نهال برای بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک مانند پتانسیل آبی آوند چوبی و محتوای نسبی رطوبت برگ انتخاب شد. پتانسیل آبی آوند چوبی با استفاده از دستگاه Pressure Chamber, Skye, SKPM 1400, UK اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری محتوای نسبی رطوبت برگ (Relative Water Content) برگ‌های انتهایی گیاه که

به اندازه وزن خشک اندام هوایی افزوده شد. همچنین، در هر یک از سطوح نانو با افزایش اندازه خشکی از مقدار وزن خشک اندام هوایی کاسته شد (شکل ۱). با این حال، اثر خشکی، نانو و اثر متقابل آن‌ها روی وزن خشک‌ریشه در سطح ۵ درصد اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۲). با افزایش تنش کم‌آبی (صرف‌نظر از نانو سیلیکا)، رویش طولی نهال‌ها کاهش یافت (شکل ۱) این در حالی است که صرف‌نظر از تنش کم‌آبی نانو-ذره سبب بهبود رویش طولی نهال‌ها شد و بیشترین اندازه رویش در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد (شکل ۱).

نتایج مربوط به اندازه‌گیری پتانسیل آبی نشان داد که تنها تنش خشکی در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر پتانسیل آبی آوند چوبی داشت، درحالی‌که نانو ذرات و اثر متقابل نانو ذرات و تنش خشکی در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر پتانسیل آبی آوند چوبی نداشت (جدول ۳). در حقیقت، با افزایش شدت کم‌آبی اندازه پتانسیل آبی منفی‌تر شد، اما در ارتباط با اثر نانو ذرات سیلیکا هیچ روند مشخصی مشاهده نشد (جدول ۴). تأثیر نانو و تنش خشکی روی محتوای نسبی رطوبت برگ (RWC) نهال‌های کاج سیاه در سطح ۵ درصد معنی‌داری بود (جدول ۳). با افزایش تنش خشکی، محتوای نسبی رطوبت برگ کاهش یافت (جدول ۴). این در حالی است که افزایش غلظت‌های نانو سیلیکا روندی افزایشی در این شاخص ایجاد کرد (جدول ۴) و در کل بیشترین مقدار رطوبت نسبی برگ به تنش خشکی چهارروزه و غلظت ۱۰۰ میلی-لیتر نانو سیلیکا اختصاص داشت. تنش خشکی روی نشت الکتروولت کاج سیاه تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۳). به‌طوری‌که با افزایش تنش خشکی این شاخص افزایش یافته است (جدول ۴).

بودن و همگن بودن داده‌های کمی به ترتیب از آزمون‌های کولموگوروف اسمیرنوف (-Kolmogorov Smirnov) و لون (Levene) استفاده شد. بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها برای درک اثر "خشکی" و "نانو ذرات" از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan) استفاده شد.

## نتایج

نتایج نشان داد که اثر خشکی و نانو ذرات و اثر متقابل آن‌ها روی رویش قطری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود (جدول ۲). اثر خشکی و نانو روی رویش طولی کاج سیاه در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده است. در حقیقت، با افزایش شدت تنش و نیز افزایش سطح غلظت نانو تغییر معنی‌داری در اندازه رویش قطری ایجاد نشد (شکل ۱). تأثیر تنش کم‌آبی بر طول ریشه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد، طوری که نتایج تجزیه واریانس دوطرفه نشان داد که طول ریشه نهال‌های کاج سیاه تحت تأثیر تنش خشکی، نانو و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفت. اسپری با نانو ذرات سیلیکا در غلظت‌های مختلف سبب افزایش قابل توجه طول ریشه نهال‌های کاج سیاه شد (به‌ویژه در آبیاری هشت‌روزه) (شکل ۱) و بیشترین اندازه رویش طولی ریشه به غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو و تنش خشکی هشت‌روزه اختصاص داشت. در هر یک از سطوح نانو نیز با افزایش اندازه خشکی به طول ریشه افزوده شد (شکل ۲). اثر خشکی، نانو و اثر متقابل آن‌ها روی وزن خشک اندام هوایی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین وزن خشک اندام‌هایی گیاه به غلظت ۱۰۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذره سیلیکا و خشکی چهارروزه اختصاص داشت. در هر یک از سطح تنش خشکی با افزایش غلظت نانو ذرات

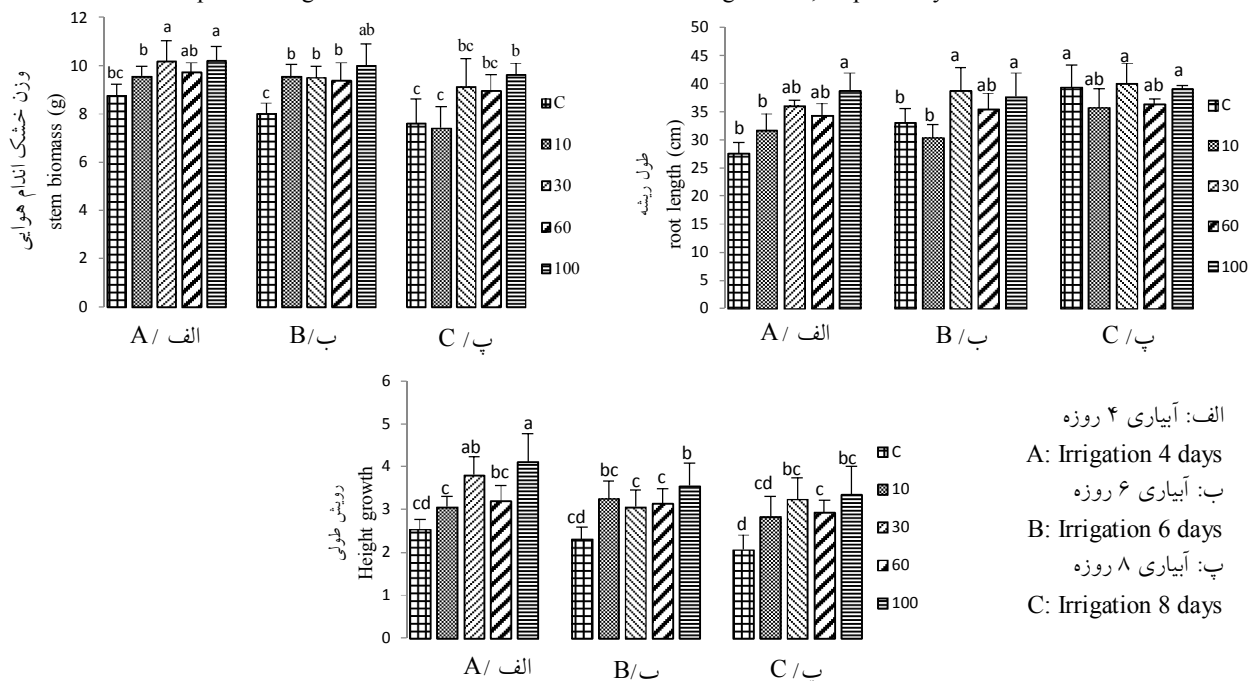
جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس دوطرفه با دو عامل اصلی نانو ذرات و تنش خشکی

Table 2. The two-way ANOVA results with nanoparticles and drought stress (as fixed factors) on *Pinus nigra* seedlings

میانگین مربعات Mean of squares				منبع تغییر Source of variation
ضریب تغییرات CV	نانو ذرات × تنش خشکی nanoparticles × drought stress	نانو ذرات nanoparticles	تنش خشکی drought stress	
9.21	0.15 <sup>ns</sup>	5.02 <sup>**</sup>	1.18 <sup>*</sup>	رویش طولی Height growth
11.75	0.22 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>	رویش قطری Diameter growth
17.93	0.13 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	وزن خشک ریشه Root biomass
15.82	2.14 <sup>*</sup>	2.84 <sup>**</sup>	4.41 <sup>**</sup>	وزن خشک اندام هوایی Shoot biomass
14.98	16.85 <sup>*</sup>	33.67 <sup>**</sup>	75.8 <sup>**</sup>	طول ریشه Root length
7.59	44.04 <sup>ns</sup>	115.28 <sup>ns</sup>	135.74 <sup>ns</sup>	زنده‌مانی Survival

- \*\* و ns به ترتیب مبین معنی‌داری و عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد

- \*\* and ns represents significant difference at 5% level and not significant, respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین شاخص‌های رویشی کاج سیاه تحت تأثیر تنش خشکی و نانو ذرات در سطح پنج درصد. حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

Figure 1. Mean comparison of growth indices of *Pinus nigra* seedlings under drought stress and nanoparticles at level 5%. Similar letters indicate no significant differences at level 5%.

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس دوطرفه با دو عامل اصلی نانو ذرات و تنش خشکی

Table 3. The two-way ANOVA results with nanoparticles and drought stress (as fixed factors) on *Pinus nigra* seedlings

میانگین مربعات Mean of squares				منبع تغییر Source of variation
ضریب تغییرات CV	نانو ذرات × تنش خشکی nanoparticles × drought stress	نانو ذرات Nanoparticles	تنش خشکی drought stress	
7.66	0.71 <sup>ns</sup>	2.39**	2336**	محتوای نسبی رطوبت برگ RWC (%)
12.98	267.56 <sup>ns</sup>	498.33 <sup>ns</sup>	132.75**	نشت الکترولیت ELI (%)
16.63	0.095 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	1.78**	پتانسیل آبی آوند چوبی Xylem predawn water potential (Mpa)

- \*\* و ns به ترتیب مبین معنی‌داری و عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد

- \*\* and ns represents significant difference at 5% level and not significant, respectively.

جدول ۴- شاخص‌های فیزیولوژیکی کاج سیاه تحت تأثیر تنش خشکی و نانو ذرات

Table 4. The effect of drought stress and nanoparticles on physiological indices of *Pinus nigra* seedlings

پتانسیل آبی آوند چوبی Xylem predawn water potential (Mpa)	نشت الکترولیت ELI (%)	محتوای نسبی رطوبت برگ RWC (%)	نانو ذرات nanoparticles	تنش خشکی Drought stress
-1.49±0.13	50.92±7.16c	86.84±2.92ab	0	آبیاری چهارروزه Irrigation 4 days
-1.61±0.12	56.44±7.41bc	87.44±1.55ab	10	
-1.55±0.19	48.7±6.66c	85.67±3.83ab	30	
-1.26±0.10	42.40±4.09d	90.39±3.24a	60	
-1.69±0.19	53.82±1.03bc	90.13±4.03a	100	آبیاری شش‌روزه Irrigation 6 days
-1.98±0.16	73.79±3.57a	79.32±2.30b	0	
-1.93±0.33	53.74±7.30bc	77.55±1.50b	10	
-2.1±0.08	64.50±7.34b	85.46±5.04ab	30	
-1.80±0.17	42.57±5.82d	84.37±4.01ab	60	آبیاری هشت‌روزه Irrigation 8 days
-1.63±0.14	53.52±9.29bc	86.47±2.42ab	100	
-2.15±0.15	75.62±9.89a	73.13±3.58c	0	
-2.12±0.26	68.14±4.82ab	80.08±3.96b	10	
-2.56±0.14	69.21±7.74ab	84.79±4.43ab	30	
-2.26±0.17	62.60±8.46b	81.28±2.63b	60	
-1.97±0.14	62.09±7.06b	84.89±4.10ab	100	

- اعداد نشان‌دهنده میانگین ± انحراف معیار هستند. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن در سطح اطمینان ۹۵ درصد حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار است.

- The numbers represent mean ± standard deviation. The results of mean comparison by Duncan's test. Similar letters indicate no significant differences.

صفات رویشی به‌ویژه رویش طولی داشته است. Bao-

shan و همکاران (2004) گزارش کردند که نانو ذرات SiO<sub>2</sub> در غلظت ۵۰۰ μL.L<sup>-1</sup> موجب افزایش ارتفاع، قطر یقه، طول ریشه‌های اصلی و تعداد ریشه‌های

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تغذیه نهال‌های کاج سیاه با استفاده از نانو ذرات از نظر اثربخشی تأثیر مطلوب و معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر برخی

(2006) نیز گزارش شده است. برخلاف نتایج این تحقیق، Zhang و همکاران (2013) عنوان کردند که با اعمال نانو سیلیکا در دو رژیم آبی، مقدار RWC برگ نهال‌های شاه‌بلوط تغییری نکرد. در پژوهش‌های Ashkavand (2014) نیز با اعمال نانو ذرات سیلیکا بر نهال‌های زالزالک زرد (*Crataegus aronia L.*) و محلب (*Prunus mahaleb L.*) تغییر معنی‌داری در مقدار RWC تحت تأثیر نانو ذرات سیلیکا مشاهده نشد؛ اما در تحقیقی دیگر (Zarafshar 2014) با اعمال کود دهی نانو ذرات سیلیکا بر نهال‌های گلابی وحشی مقدار RWC تا ۵۲ درصد افزایش یافت.

پتانسیل آبی ساقه، شاخص مناسبی برای نمایش عملکرد گونه‌های مختلف در مواجهه با تنش خشکی است (Moriana et al., 2012). نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش طول دوره آبیاری، پتانسیل آبی نهال‌ها منفی‌تر شد، اما نانو ذرات سیلیکا تغییری روی پتانسیل آبی نهال‌های کاج سیاه نشان نداد. از طرفی، سیلیکا می‌تواند با افزایش توانایی در جذب آب سبب مقاومت به خشکی در گیاه بشود که این یافته در رابطه با گیاه ذرت تحت تنش خشکی تأیید شده است (Ahmed et al., 2011). در تحقیقی روی نهال‌های زالزالک و محلب، با افزایش غلظت نانو ذرات سیلیکا بخصوص در شرایط تنش شدید خشکی پتانسیل آبی آوند چوبی بهبود پیدا کرده است (Ashkavand, 2014).

نرخ نشت الکترولیت، معیار مناسبی برای ارزیابی میزان تخریب سلول گیاهی در طی تنش‌های محیطی است (Campos et al., 2009). پژوهش‌های گذشته نشان داده است که سیلیکا قادر است از نشت الکترولیت جلوگیری کند (Shen et al., 2010). در تحقیق حاضر تنش خشکی و اعمال تیمارهای نانو ذرات سیلیکا روی نرخ نشت الکترولیت معنی‌دار نبوده

جانبی نهال‌های *Larix olgensis* شد و به اثرهای مثبت نانو ذرات  $SiO_2$  روی توسعه رشد و بهبود کیفیت نهال‌ها دست یافتند. پژوهش Zarafshar (2014) نشان داد که نانو ذرات تأثیر عمده‌ای بر صفات مورفولوژیکی مانند زی‌توده ریشه و زی‌توده برگ گونه گلابی وحشی داشته است. همچنین Ashkavand (2014) نشان می‌دهد که نانو ذرات تأثیر قابل توجهی بر بیشتر صفات مورفولوژیکی دو گونه محلب (*Prunus mahaleb L.*) و زالزالک زرد (*Crataegus aronia L.*) داشته است.

به‌طورمعمول گیاهان، در مواجهه با تنش خشکی انرژی خود را در افزایش زی‌توده ریشه متمرکز می‌کنند (Arndt et al., 2001). نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که نانو ذرات سیلیکا در شرایط تنش خشکی نقش معنی‌داری در جذب آب و رشد ریشه دارد (Ahmed et al., 2008). در این پژوهش نیز تأثیر نانو ذرات سیلیکا روی افزایش طول ریشه در نهال‌های کاج سیاه در شرایط تنش معنی‌دار بود. به‌طورکلی مرور منابع گذشته نشان داده است که تأثیر مثبت نانوذره سیلیکا در شرایط مطلوب (غیر تنش) گیاه مشهود نیست، اما در شرایط غیر مطلوب (تنش) به‌صورت معنی‌داری قابل‌مشاهده است (Ahmed et al., 2006; Henriet et al., 2006). البته در بررسی حاضر تأثیر نانو ذرات سیلیکا روی برخی مشخصات مورفولوژی گیاه در شرایط تنش خشکی مشهود بوده است. محتوای نسبی رطوبت برگ (RWC)، نشان‌دهنده رابطه بین صفات فیزیولوژی و سطح تحمل به خشکی است (Farooq et al., 2009). در این تحقیق محتوای نسبی رطوبت برگ تحت تأثیر تنش خشکی و نانو ذرات سیلیکا قرار گرفت. تأثیر مثبت سیلیکا بر محتوای نسبی رطوبت در بررسی‌های Gunes و همکاران (2008) و Kaya و همکاران



بررسی‌های بعدی از غلظت‌های بیشتر این نوع نانو مواد برای افزایش رویش نهال کاج سیاه استفاده شود. قطعاً پژوهش‌های کامل‌تر در رابطه با استفاده از این نانو ذرات و یا دیگر نانو ذرات، در دوره‌های طولانی‌تر می‌تواند نتایج دقیق‌تری ارائه دهد و مکانیسم گیاه را در پاسخ به نانو ذرات در شرایط تنش‌های محیطی و غیر محیطی پوشش دهد. همچنین، بررسی‌های کامل‌تری برای درک مکانیسم مولکولی به‌ویژه پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی ضروری است.

است. در بررسی‌های گذشته تأثیر نانو ذرات را روی تغییرات نشت الکتروولت متفاوت گزارش کرده‌اند چنان‌که (Zarafshar 2014) نشان داده است که اعمال نانو ذرات سیلیکا بر تعدیل نشت الکتروولت در گلابی وحشی مؤثر بوده‌اند. در یک تحقیق دیگر نیز (Ashkavand 2014) بیان کرده است نانو ذرات سیلیکا سبب کاهش معنی‌دار نشت الکتروولت در دو گونه زالزالک و محلب شده است.

به‌طورکلی، در تحقیق حاضر چون تأثیر غلظت-های اعمال‌شده نانو منفی نبود، پیشنهاد می‌شود برای

## References

- Ahmed, A.H., E.M. Harb, M.A. Higazy & S. Morgan, 2008. Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions, *International Journal of Agricultural Research*, 3(1):1-26
- Ahmed, M., F. Hassen, U. Qadeer & M.A. Aslam, 2011. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum, *African Journal of Agricultural Research*, 6(3):594-607.
- Arji, I. & K. Arzani, 2003. Evaluation of the growth responses and proline accumulation of three Iranian native olive cultivars under drought stress, *Journal of Agriculture Science Natural Resources*, 10(2): 91-101. (In Persian)
- Arndt, S.K., S.C. Clifford & W. Wanek, 2001. Physiological and morphological adaptations of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress, *Tree Physiology*, 21(11): 705-715.
- Ashkavand, P., 2014. Effect of Nanosilicon on Growth and Physiology of Hawthorn (*Crataegus aronia* L.) and Mahaleb Cherry (*Prunus mahaleb* L.) Seedlings under Drought Stress. M.Sc thesis. Department of Forestry. Faculty of Natural Resources. Tarbiat Modares University. Nur, Iran, 118 p. (In Persian)
- Bandani, M. & A. Abdolzadeh, 2007. Effects of silicon nutrition on salinity tolerance of *Puccinellia distans* (jacq.) parl, *Journal of Agriculture Science Natural Resources*, 14(3): 111-119. (In Persian)
- Bao-shan, L., D. shao-q, L. Chun-hui, F. Li-jun, Q. Shu-chun & Y. Min, 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings, *Journal of Forestry Research*, 15(2): 138-140.
- Blum A. & C.Y. Sullivan, 1986. The comparative drought resistance of landraces of sorghum and millet from dry and humid regions, *Annals of Botany*, 57(6): 835-846.
- Campos, P.S., V. Quartin, J.C. Ramalho & M.A. Nunes, 2009. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. Plants, *Journal of Plant Physiology*, 160(3): 283-292.
- Chen, W., X. Yao, K. Cai & J. Chen, 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption, *Biological trace element research*, 142(1): 67-76.
- Farooq, M., A. Wahid, N. Kobayashi, D. Fujita & S.M.A. Basra, 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, pp. 153-188.
- Golparyar, A.R., M.R. Ghanadha, A.A. Zali, A. Ahmadi, E.M. Harvan & A. Ghasemi, 2006. Factor analysis of morphological and morpho-physiological traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under drought and non-drought stress conditions, *Pajouhesh & Sazandegi*, 72:52-59. (In Persian)
- Gunes, A., D.J. Pilbeam, A. Inal & S. Coban, 2008. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: growth,

- antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(13-14):1885-1903.
- Haghghi, M., Z. Afifipour & M. Mozafarian, 2012. The Effect of N-Si on Tomato Seed Germination under Salinity Levels, *Journal of Biological and Environmental Sciences*, 6(16):87-90
  - Henriet, C., X. Draye, I. Oppitz, R. Swennen & B. Delvaux, 2006. Effects, distribution and uptake of silicon in banana (*Musa spp.*) under controlled conditions, *Plant and Soil*, 287(1):359-374
  - Huang, B., 2000. Role of morphological and physiological characteristics in drought resistance of plants. In: Willkinson, (Eds.), *Plant-Environmental Interactions*. Marcel Dekker inc. New York, pp: 39-64.
  - Kaya, C., L. Tuna & D. Higgs, 2006. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions, *Journal of Plant Nutrition*, 29(8):1469-1480.
  - Ma, J.F. & N. Yamaji, 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants, *Trends in Plant Science*, 11(8): 392-397.
  - Magrokosho, C. & K. Pixley, 1995. Drought tolerance at flowering and cross-over interaction for yield of three maize of Zimbabwe. CIMMYT, Mount Pleasant, Harare, Zimbabwe.
  - Moriana, A., D. Pérez-López, M.H. Prieto, M. Ramírez-Santa-Pau & J.M. Pérez-Rodríguez, 2012. Midday stem water potential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees, *Agricultural Water Management*, 112: 43-54.
  - Pei, Z.F., D.F. Ming, D. Liu, G.L. Wan, X.X. Geng, H.J. Gong & W.J. Zhou, 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings, *Journal of Plant Growth Regulation*, 29(1): 106-115.
  - Schaller, J., C. Brackhage, S. Paasch, E. Brunner, E. Bäucker & E.G. Dudel, 2013. Silica uptake from nanoparticles and silica condensation state in different tissues of *Phragmites australisi*, *Science of the Total Environment*, 442(1): 6-9.
  - Shen, X., Y. Zhou, L. Duan, Z. Li, A.E. Eneji & J. Li, 2010. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation, *Journal of Plant Physiology*, 167(15):1248-1252.
  - Siddiqui M.H. & M.H. Al-Wahaibi, 2013. Role of nano-SiO<sub>2</sub> in the germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill), *Saudi Journal of Biological Sciences*.
  - Wang X., Z. Wei, D. Liu & G. Zhao, 2011. Effects of NaCl and silicon on activities of antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa, *African Journal of Biotechnology*, 10(4): 545-549.
  - Yuvakkumar, R., V. Elango, V. Rajendran, N.S. Kannan & P. Prabu, 2011. Influence of Nanosilica Powder on the Growth of Maize Crop (*Zea Mays* L.), *International Journal of Green Nanotechnology*, 3(3): 180-190.
  - Zarafshar, M., 2014. The Responses of Wild Pear Seedling to Drought Stress and Efficiency of TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> Nano-particles in alleviating the Deleterious Effects of Drought Stress. PhD thesis. Department of Forestry. Faculty of Natural Resources. Tarbiat Modares University. Nur, Iran, 146 p. (In Persian)
  - Zare, H., 2001. Native and non-native conifer in Iran. *Research Institute of Forests and Rangelands*. 498 p. (In Persian)
  - Zhang, C., J.M. Moutinho-Pereira, C. Correia, J. Coutinho, A. Gonçalves, A. Guedes & J. Gomes-Laranjo, 2013. Foliar application of Sili-K® increases chestnut (*Castanea spp.*) growth and photosynthesis, simultaneously increasing susceptibility to water deficit, *Plant and Soil*, 365(1-2): 211-225.

## Effect of SiO<sub>2</sub> NPs nanoparticles on morphophysiological characteristics of *Pinus nigra* under drought stress

S. Dehghan<sup>\*1</sup>, M. Tabari Kochak Saraei<sup>2</sup> and Gh. Jalali<sup>3</sup>

1- M.Sc. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran.

2- Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran.

3- Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran.

Received: 17.08.2016

Accepted: 18.12.2016

### Abstract

Exploitation and use of new technologies for improving of deleterious effects of drought stress are of great importance. An experiment was operated on *Pinus nigra* in order to investigate the effects of silicon (SiO<sub>2</sub>) (SNPs) nanoparticles on declining the deleterious effects of water stress. Nanoparticles spraying with 0, 10, 30, 60 and 100 ppm were applied every week for five months on the leaves of seedlings irrigated based on field capacity in the intervals of 4, 6 and 8 days. Applying SiO<sub>2</sub> NPs increased height growth, water potential, relative water content and decreased electrolyte leakage. The increased SiO<sub>2</sub> improved aboveground biomass and root length of seedlings as affected by drought stress. In general, it can be deduced that in this study the use of silicon nanoparticles, especially concentrations of 60 and 100 mgr/l, induces growth and physiological activities of *Pinus nigra* seedlings under drought stress.

**Keywords:** Drought stress, Electrolyte leakage, *Pinus nigra*, Silica nanoparticle, Water potential.

---

\* Corresponding author: Email: sevda.dehghan1369@gmail.com