



فصلنامه علمی فناوری و علوم جنگل

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و ششم، شماره چهارم، ۱۳۹۸

۸۵-۱۰۰

<http://jwfst.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwfst.2020.13986.1715

اثر نانوذرات سیلیس بر خصوصیات فیزیولوژیک نهال بنه (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*) تحت تنش خشکی

کلثوم محمودی^۱، یاسر علیزاده^۲، هزندی عبدالحمید^۳ و حمیدرضا ناجی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم جنگل، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران،

^۲ استادیار گروه زراعت، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران،

^۳ استاد مؤسسه تحقیقات جنگل و فرآورده‌های چوب گرمسیری (INTROP)، یو پی ام مالزی،

^۴ استادیار گروه علوم جنگل، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۹

چکیده

سابقه و هدف: یافتن گونه‌های مقاوم به خشکی با هدف احیای جنگل‌های زاگرس از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعات چندانی درباره تأثیر نانوذرات بر گیاهان چوبی به‌خصوص تغییر در خصوصیات فیزیولوژیک آن‌ها صورت نگرفته و بیش‌تر پژوهش‌ها در این زمینه به گیاهان علفی و زراعی معطوف می‌شود. بنابراین، در پژوهش حاضر، اثر نانوذرات سیلیس بر نهال‌های بنه (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*) به‌منظور شناخت واکنش گیاه به تنش وارده جهت دستیابی احتمالی به گونه‌ای مقاوم به خشکی با هدف احیای جنگل‌های زاگرس پرداخته شد.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر با تعداد ۱۲۶ اصله نهال در قالب فاکتوریل و بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، شش سطح نانوذرات سیلیس (صفر، ۱۰۰، ۳۰۰، ۷۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به‌مدت ۳۰ روز و سه سطح تنش خشکی (شاهد، آبیاری یک روز در میان؛ متوسط، آبیاری چهار روز در میان؛ و شدید، قطع کامل آبیاری) انجام شد. در پایان آزمایش، صفات فیزیولوژیک کلروفیل a، b، کلروفیل کل، کاروتنوئید، هیدرات‌های کربن، محتوای پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز گایاکول و کاتالاز در برگ نهال‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از نانوذرات سیلیس سبب افزایش انواع کلروفیل و کاروتنوئید، افزایش پرولین، کربوهیدرات و آنتی‌اکسیدان‌ها تحت تنش خشکی گردید. نهال‌ها به تیمارهای نانوذرات واکنش‌های متفاوتی نشان دادند، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار کربوهیدرات و کاتالاز در غلظت ۷۰۰، کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید در غلظت ۳۰۰۰ و پرولین و پراکسیداز نیز در غلظت ۳۰۰ مشاهده شد. همچنین، سطوح تنش خشکی سبب کاهش انواع کلروفیل، کاروتنوئید و افزایش کربوهیدرات محلول، پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شد.

نتیجه‌گیری: در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که بسیاری از صفات فیزیولوژیک تحت‌تأثیر تنش خشکی افزایش یافتند و نانوذرات سیلیس اثر مثبتی بر صفات انواع کلروفیل و کاروتنوئید داشتند. غلظت‌های ۳۰۰، ۷۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به سایر

* مسئول مکاتبه: h.naji@ilam.ac.ir

غلظت‌ها روی بسیاری از صفات فیزیولوژیک مذکور مؤثر بودند. کاهش انواع کلروفیل و کاروتنوئید و افزایش کربوهیدرات، پرولین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از روش‌های مقابله گیاهان به تنش خشکی اعمال شده می‌باشد. با توجه به فقدان اطلاعات پایه‌ای درباره مکانیسم‌های مقاومتی در گونه‌های بومی جنگلی زاگرس در پاسخ به نانوذرات، این پژوهش کمک فراوانی به توسعه دانش نانوتکنولوژی در گیاهان چوبی خواهد نمود. مطالعات در مورد تأثیر نانوذرات سیلیس برای دوره‌های آزمایش طولانی‌تر و نیز گونه‌های مختلف می‌تواند راه مناسبی برای یافتن نتایج بهتر و مستدل‌تر باشد که شاید در نهایت منجر به تولید اقتصادی نهال‌های مقاوم به خشکی شود.

واژه‌های کلیدی: بنه، کلروفیل، مقاومت به خشکی، نانوذرات سیلیس، ویژگی‌های فیزیولوژی برگ

مقدمه

نگهداری بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی و فتوسنتزی زیاد می‌کنند. در نتیجه تنش خشکی را کنترل می‌کند و مقدار آسیب وارده به گیاهان را به حداقل می‌رسانند (۱۸). اشکاوند و همکاران (۲۰۱۵) با اعمال نانوذرات سیلیس در غلظت‌های کم بر روی نهال زالزالک زرد (*Crataegus azarolus*) تحت تنش خشکی به این نتیجه رسیدند که این ذرات نقش مثبتی در حفظ و عملکرد فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی حیاتی ایفا می‌کنند، به طوری که تحت تأثیر تیمار نانوذرات سیلیس، زی‌توده نهال و رنگدانه‌های کلروفیل و کاروتنوئید افزایش یافتند. به علاوه، کربوهیدرات و محتوای پرولین با اعمال نانوذرات سیلیس به‌ویژه با افزایش تنش خشکی کاهش یافتند (۵).

مطالعات زیادی درباره اثر تنش خشکی بر گونه‌های چوبی جنگلی صورت گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تأثیر تنش خشکی بر زنده‌مانی نهال‌های بنه (*Pistacia atlantica*) توسط میرزایی و کرمشاهی (۲۰۱۵)؛ پاسخ فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نهال‌های بنه خینجوک (*Pistacia khinjuk*) تحت تنش خشکی توسط میرزایی و یوسف زاده (۲۰۱۵) و تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های رویشی پنج گونه اکالیپتوس اشاره کرد (۲۰، ۲۹ و ۳۰). هم‌چنین، والادارس و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که

تنش خشکی رویش گیاهان را به شدت متأثر می‌کند (۲۳). واکنش گیاه نسبت به خشکی به شدت و مدت آن، گونه گیاهی و عملکرد فیزیولوژیک گیاه بستگی دارد (۹). به نظر می‌رسد که تنش خشکی و کمبود آب در بافت‌های گیاهی باعث کاهش رشد، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز، تغییر در تنفس، تخریب آنزیم‌ها و تجمع پرولین می‌گردد (۳۴). علی‌رغم این‌که سیلیس به مقدار کمی در اختیار گیاهان قرار دارد، اما گیاهان آن را از محلول خاک به شکل ترکیب و در غلظت‌های پایین جذب می‌کنند و در سطوح اپیدرمی برگ خود ذخیره نموده و در فرآیند رشد استفاده می‌کنند (۳۶). فناوری نانوذرات یک علم جدید محسوب شده و امروزه نانوذرات سیلیس بسیار مورد توجه قرار گرفته است و پژوهش‌های محدودی هم در این رابطه انجام شده است. با بروز تنش‌های محیطی، نانوذرات سیلیس با افزایش در فعالیت آنزیم‌های اکسیدکننده و بالا بردن محتوای اسمولیت‌ها، در ایجاد مقاومت به انواع تنش‌های زنده و غیر زنده (مثل تنش خشکی، سرما، گرما و فلزات سنگین) نقش مهمی را در گیاهان ایفا می‌کند (۴). نانوذرات سیلیس مقاومت گیاهان در مقابل تنش خشکی را با افزایش دفاع آنتی‌اکسیدان، کاهش آسیب اکسیداتیو به مولکول‌های غشا و

پذیرش شرایط سخت محیطی در طول سالیان دراز دارد که خود بیانگر اهمیت و ارزش آن در جهت اصلاح و احیاء حوضه‌های آبخیز و جلوگیری از فرسایش خاک است (۱۶).

به‌علت کمبود منابع علمی در تشریح واکنش گیاهان به‌خصوص درختان به ذرات نانو و نقش این ذرات در افزایش مقاومت و تحمل آنها به تنش‌های محیطی همانند خشکی، مطالعه حاضر به بررسی واکنش نهال بومی گونه بنه (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*) در منطقه زاگرس به نانوذرات سیلیس پرداخته است. در این مطالعه، تأثیر تنش خشکی بر ویژگی‌های فیزیولوژیک نهال بنه و نقش فن‌آوری‌های جدید همانند نانوذرات سیلیس در تغییر مقاومت آن بررسی گردید. بنابراین، شناخت ویژگی‌ها و تأثیرگذاری این مواد به‌عنوان دانشی بنیادین و اصولی، کمک شایانی به شناخت این مواد و اثر آنها و همچنین یافتن گونه‌های مفید و مقاوم به خشکی جهت احیا جنگل‌های زاگرس خواهد شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه: پژوهش حاضر در نهالستان آموزشی - پژوهشی جنگل دانشگاه ایلام در شهر ایلام انجام گرفت. شهر ایلام دارای آب و هوای معتدل کوهستانی است که در شمال‌غرب استان ایلام قرار گرفته است. اطلاعات پایه‌ای از وضعیت محل مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است. آمار ایستگاه‌های مطالعاتی نشان می‌دهد که دی و بهمن به‌عنوان سردترین ماه و تیر و مرداد به‌عنوان گرم‌ترین ماه سال می‌باشند (۲۲).

با افزایش تغییرپذیری و انعطاف در ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان، مقاومت آنها به تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد و بعد از اعمال تنش سریع‌تر به حالت طبیعی برمی‌گردند. تغییر در ویژگی‌های کلروفیل برگ نیز به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پی‌بردن به اثر تنش بر شرایط فیزیولوژیک گیاه شناخته می‌شود (۳۷). عوامل تنش‌زا با تغییر در فرآیندهای فتوسنتزی، فلورسانس کلروفیل برگ را تغییر می‌دهند (۲۴).

با توجه به تأثیر نانوذرات در کنترل تنش خشکی در گیاهان، در زیر مرور کوتاهی از تأثیر این تنش بر گیاهان غیرجنگلی خواهیم داشت. سعیدی و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که تنش خشکی در گندم نان بر روی عملکرد کلروفیل a, b و پروکلین اثر منفی می‌گذارد (۳۲). گونگ و همکاران (۲۰۰۵) بیان نمودند که کاربرد سیلیس در گیاه گندم (*Triticum aestivum*) تحت تنش خشکی باعث افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (SOD و Cat) می‌شود (۱۷). یاواکومار و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای بر روی گیاه ذرت نشان دادند که اعمال نانوذرات سیلیس به‌صورت پودر و مخلوط با خاک گلدان باعث افزایش ضریب بهره‌وری آب و افزایش کلروفیل می‌شود (۴۱).

گونه بنه (*Pistacia atlantica*) از مهم‌ترین گونه‌های درختی رویشگاه جنگلی زاگرس است که سطحی معادل ۲/۴ میلیون هکتار از مساحت ایران را به خود اختصاص داده است. درخت بنه گیاهی است کم‌نیاز و مقاوم به سرما و گرما و در خاک‌های مختلف رشد می‌کند. حضور این گونه در مناطق سنگلاخی و صخره‌ها نشان از تحمل این گونه در

جدول ۱- اطلاعات اولیه از نهالستان پژوهشی دانشگاه ایلام.

Table 1. Basic information of research nursery of Ilam University.

حداکثر دما درجه سانتی‌گراد Max.T*** (°C)	حداقل دما درجه سانتی‌گراد Min.T** (°C)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) A.A.P* (mm)	ارتفاع (متر) Altitude (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude
42	-13	537.7	1457	45°41'07"	33° 21'30"

*A.A.P: Average annual precipitation; **Min.T: Minimum temperature; ***Max.T: Maximum temperature.

اصله نهال بود. نهال‌های بنه از نهالستان سردسیری جنگلی اداره منابع طبیعی شهرستان ایوان، استان ایلام تهیه شد. نهال‌های دو ساله بنه با تعداد ۱۶۲ اصله در اسفندماه ۱۳۹۴ به‌منظور انجام پژوهش به نهالستان علمی- پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام منتقل گردیدند. ابتدا نهال‌ها به گلدان‌های سه کیلویی با ترکیب دو واحد خاک، یک واحد ماسه‌بادی و یک واحد کود پوسیده دامی منتقل شدند. پس از گذشت دو ماه از بازکاشت نهال‌ها و تطبیق با شرایط محیطی، نهال‌ها برای اجرای آزمایش آماده شدند. در این پژوهش از نانوذرات سیلیس با مشخصات ارائه‌شده در جدول ۲ استفاده شد.

روش کار: به‌منظور ارزیابی اثر نانوذرات سیلیس بر نهال‌های گونه بنه (*Pistacia atlantica* subsp. *Mutica*) در شرایط تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و ۱۸ تیمار اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل ۶ سطح مختلف نانو ذرات: صفر (شاهد)، ۱۰۰، ۳۰۰، ۷۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ (میلی‌گرم بر لیتر) و سه سطح تنش خشکی به‌صورت آبیاری مطلوب (۱۰۰٪ ظرفیت زراعی)، تنش ملایم (۷۰٪ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (قطع کامل آبیاری) بود. همچنین، قابل‌ذکر است که برای هر کرت آزمایشی سه اصله نهال در نظر گرفته شد که در مجموع نهال‌های آزمایشی ۱۶۲

جدول ۲- مشخصات نانوذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر.

Table 2. The characteristics of nanoparticles used in this study.

نانوذرات سیلیس Nano SiO ₂	ساختار نانو Nanostructure
SiO ₂	فرمول شیمیایی Chemical formula
سفید White	رنگ Color
کروی Spherical	مورفولوژی Morphology
20 nm	اندازه ذره Particle size
210 m ² /g	مساحت سطح ویژه Specific surface area
99.5%	درصد خلوص Purity (%)
آلمان Germany	ساخت Origin
پاسارگاد نوین تهران Pasargad Novin-Tehran	خریداری‌شده Bought from

محتوای پرولین از روش بیتمس و همکاران (۱۹۷۳)، اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان پراکسیداز گایاکول و کاتالاز با روش چنس و مهلی (۱۹۵۵) و ابی (۱۹۸۴) استفاده شد (۱، ۸، ۱۱، ۲۶ و ۳۳).

تجزیه و تحلیل داده‌ها: پس از آزمون مفروضات تجزیه واریانس شامل نرمال بودن داده‌ها (به روش کولموگروف-اسمیرنوف) و هم‌چنین همگنی واریانس تیمارهای آزمایشی (به روش آزمون لون)، برای ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شده، تجزیه واریانس یک‌طرفه ANOVA انجام شد. مدل آماری GLM برای تجزیه واریانس به کار رفت. مقایسه میانگین تیمارها با آزمون تفاوت‌های معنی‌دار قابل اعتماد (HSD) توکی در سطح یک و پنج درصد انجام شد. نرم‌افزار مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها Minitab. Ver. 16 بود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که اثر کاربرد نانوذرات سیلیس، تنش خشکی و اثر برهمکنش این دو بر تمامی صفات مورد ارزیابی در نهال بنه شامل غلظت کلروفیل a و b، کاروتنوئید، کربوهیدرات، پرولین، پراکسیداز گایاکول و کاتالاز در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). چون اثر متقابل تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس بر تمامی صفات مورد ارزیابی معنی‌دار شد در نتیجه، در بخش مقایسه میانگین‌ها از بیان اثرات ساده اجتناب گردید.

برای تعیین آب خاک در حالت ظرفیت زراعی، ابتدا ۱۰ گلدان کاملاً مشابه با گلدان‌های آزمایشی تا حد اشباع آبیاری شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت گلدان‌ها هر دو ساعت یک‌بار توزین شدند. در زمان ثابت شدن وزن گلدان‌ها، از هر گلدان نمونه خاک تهیه، توزین و سپس به مدت ۴۸ ساعت به آون با دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند و در انتها با استفاده از رابطه ۱ رطوبت وزنی خاک در شرایط ظرفیت زراعی محاسبه گردید (۳۱).

$$FC = \frac{FCW - DW}{DW} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، FC درصد ظرفیت زراعی خاک، DW وزن خاک خشک‌شده در آون. FCW وزن خاک در ظرفیت زراعی.

ظرفیت زراعی خاک مورد آزمایش ۲۶٪ بود. وزن خاک خشک در هر گلدان مورد آزمایش حدود ۳۰۰۰ گرم بود و میزان آب لازم برای رسیدن خاک گلدان به ظرفیت زراعی از ضرب وزن خاک خشک در ۲۶٪ محاسبه شد. اعمال تیمارهای تنش خشکی چهار هفته پس از تیمار نانوذرات سیلیس انجام شد. تیمارهای تنش خشکی به مدت چهار هفته ادامه یافت و در پایان دوره، از هر تکرار تعدادی برگ جوان و کاملاً گسترش‌یافته و زنده برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیولوژیک انتخاب شده و پس از جدا شدن در ظروف همراه یخ بلافاصله به آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام منتقل گردیدند. خصوصیات فیزیولوژیک مورد ارزیابی شامل: انواع کلروفیل (a و b)، کاروتنوئید از روش لیچتن زالر و ولبورن (۱۹۸۵)، هیدرات‌های کربن از روش اسچینگل (۱۹۵۶)،

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده گربه بنه.
Table 3. Analysis of variance of the measured physiological traits of *Pistacia atlantica*.

صفات Traits		درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variation
کاتالاز Catalase ($\text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{protein}$)	پراکسیداز گایاکول Guaiacol peroxidase ($\text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{protein}$)	0.0565**	0.0002**
0.3469**	پروترین Proline ($\mu\text{mol g}^{-1}\text{fw}$)	0.0102**	0.0051**
0.0299**	کربوهیدرات Carbohydrate ($\text{mg g}^{-1}\text{fw}$)	0.0273**	0.0130**
0.006062	کاروتنوئید Carotenoid ($\text{mg g}^{-1}\text{fw}$)	0.0006**	0.0002**
	کلروفیل کل T Chlorophyll ($\text{mg g}^{-1}\text{fw}$)	0.0001**	0.000004
	کلروفیل b Chlorophyll b ($\text{mg g}^{-1}\text{fw}$)	0.0001**	0.000004
	کلروفیل a Chlorophyll a ($\text{Mg g}^{-1}\text{fw}$)	0.0001**	0.000001
	نش خشکی Drought stress	0.0001**	0.000001
	نانوذرات SiO ₂ nanoparticles	0.0001**	0.000004
	خطا Error	0.0001**	0.000004
	نانوذرات*نش خشکی Np*Str	0.0001**	0.000004
	خطا Error	0.0001**	0.000004

*, **, * ** These are showing the significant levels at 1% and 5% with Tukey test.
 **, * نشان‌دهنده سطح معنی داری به ترتیب در سطح ۵ درصد و ۱ درصد با آزمون توکی است.

به ترتیب با ۳/۶۹، ۱/۵۷ و ۵/۲۶ میلی گرم در گرم برگ
 تر گیاه بنه در تیمار عدم کاربرد نانوذرات سیلیس به
 همراه تنش شدید خشکی مشاهده شد (جدول ۴).

اثر برهمکنش تنش خشکی و کاربرد نانوذرات
 سیلیس بر غلظت کلروفیل و کارتنوئیدها در
 نهالهای بنه: کمترین میزان کلروفیل a، b و کل

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل کاربرد نانوذرات سیلیس و تنش خشکی روی غلظت کلروفیلها و کارتنوئید گونه بنه.

Table 4. Mean comparison of interaction effects among SiO₂ nanoparticles and drought stress on chlorophyll and carotenoid content of *Pistacia atlantica*.

کارتنوئید Carotenoid (mg g ⁻¹ fw)	کلروفیل کل Chlorophyll t (mg g ⁻¹ fw)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ fw)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg g ⁻¹ fw)	سطوح تنش Stress levels	سطوح نانو Nano levels (mg.L ⁻¹)
2.93±0.026 ^{de}	12.43±0.343 ^b	3.10±0.007 ^{bcd}	8.99±0.056 ^c	شاهد Control	0
2.91±0.017 ^{def}	11.61±0.308 ^{bc}	3.02±0.002 ^{cde}	8.11±0.205 ^{cde}	متوسط Moderate	
1.68±0.340 ^{gh}	5.26±0.089 ^f	1.57±0.438 ^{def}	3.69±0.145 ^{hi}	شدید Severe	
5.70±0.620 ^a	20.41±1.09 ^a	3.28±0.240 ^{bcd}	11.63±0.453 ^b	شاهد Control	100
2.57±0.300 ^{defg}	9.27±0.211 ^{bcd}	2.37±0.157 ^{efg}	6.57±0.603 ^{def}	متوسط Moderate	
1.07±0.016 ^h	5.63±0.183 ^{cdef}	1.91±0.021 ^{fgh}	3.72±0.411 ⁱ	شدید Severe	
4.01±0.264 ^{bc}	21.51±0.534 ^a	3.70±0.022 ^a	16.78±0.975 ^a	شاهد Control	300
3.26±0.195 ^{cd}	9.94±0 ^{bcd}	3.70±0.022 ^{bc}	8.34±0.819 ^{cd}	متوسط Moderate	
1.56±0.114 ^{gh}	5.34±0.501 ^{ef}	3.75±0.180 ^b	4.03±0.974 ^{ghi}	شدید Severe	
2.16±0.001 ^{efg}	7.89±0.015 ^{cde}	2.18±0.034 ^{fgh}	5.60±0.084 ^{fgh}	شاهد Control	700
2.15±0.002 ^{efg}	6.68±0.063 ^{def}	2.15±0.017 ^{fgh}	5.19±0.026 ^{fgh}	متوسط Moderate	
1.60±0.017 ^{gh}	5.71±0.080 ^{ef}	1.65±0.046 ^{gh}	4.12±0.017 ^{ghi}	شدید Severe	
3.03±A ^{cde}	12.46±0.039 ^b	3.47±0.027 ^{bc}	9.00±A ^c	شاهد Control	1500
2.22±A ^{defg}	8.06±0.001 ^{cde}	2.03±0.001 ^{fgh}	6.02±A ^{efg}	متوسط Moderate	
1.86±0.029 ^{fgh}	7.11±0.007 ^{def}	1.86±0.020 ^{fgh}	5.19±0.023 ^{fgh}	شدید Severe	
4.78±0.055 ^{ab}	13.24±2.96 ^b	3.31±0.031 ^a	10.04±0.0006 ^{bc}	شاهد Control	3000
2.83±0.007 ^{def}	11.62±0.033 ^b	3.60±0.139 ^{bc}	8.41±0.174 ^{cd}	متوسط Moderate	
2.53±0.034 ^{def}	11.44±0.031 ^{bc}	3.41±0.007 ^{bc}	8.07±0.001 ^{cde}	شدید Severe	

مقایسه میانگینها بر اساس آزمون توکی بوده و حروف غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی دار بین تیمارها در سطح ۹۵ درصد می باشد.

Mean comparison was done based on Tukey test and non-identical letters indicating a significant difference between treatments at level of 95%.

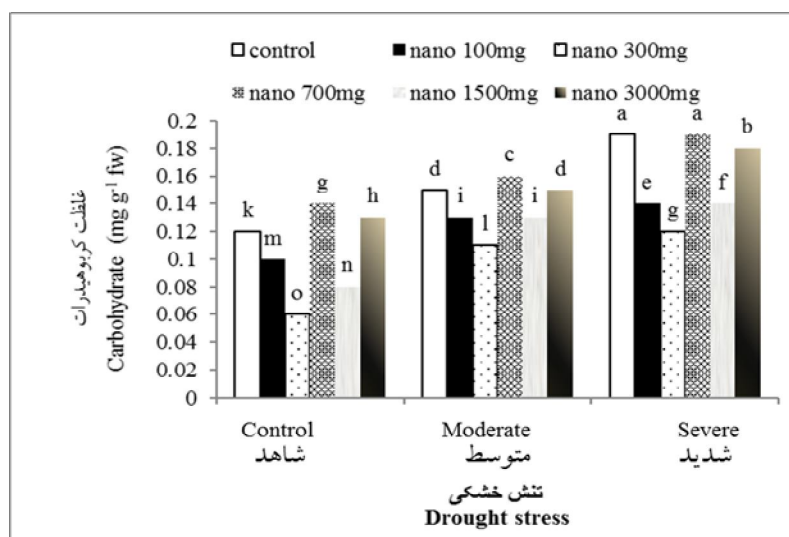
خطاهای استاندارد کم تر از ۰/۰۰۰۰۱ با حرف A جایگزین شدند.

Standard error less than 0.00001 was replaced by A letter.

بالاترین غلظت رنگیزه‌های کارتنوئید (۵/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در تیمار عدم تنش خشکی و کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. تنش خشکی همانند کلروفیل میزان کارتنوئید را نیز کاهش داد ولی بالاترین درصد کاهش در کارتنوئید کم‌تر از بالاترین میزان کاهش در کلروفیل بود (جدول ۴).

اثر بر همکنش تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس بر غلظت کربوهیدرات محلول در نهال‌های بنه: بیش‌ترین میزان کربوهیدرات محلول با ۰/۱۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ در دو تیمار عدم کاربرد نانوذرات و کاربرد ۷۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس در شرایط تنش شدید خشکی مشاهده گردید (شکل ۱). نتایج آزمایش نشان داد که در شرایطی که گیاه بنه با تنش خشکی مواجه گردید غلظت کربوهیدرات‌های محلول در این گیاه افزایش یافت به‌طوری‌که کاربرد نانوذرات نیز این روند را تغییر نداد. اگرچه در شرایط کاربرد نانوذرات غلظت کربوهیدرات‌های محلول در گیاه بنه تا حدودی کاهش یافت به‌طوری‌که کم‌ترین غلظت کربوهیدرات محلول (۰/۰۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در تیمار عدم تنش و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس مشاهده گردید (شکل ۱).

مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اثر تنش خشکی و نانوذرات سیلیس بر غلظت کلروفیل گیاه بنه نشان داد که بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۱۶/۷۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) و کلروفیل b (۳/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) و کلروفیل کل (۲۱/۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در شرایط عدم تنش و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس حاصل شد. نتایج آزمایش نشان داد که در شرایط عدم تنش، کاربرد نانوذرات سیلیس باعث افزایش رنگیزه‌های کلروفیلی گردید و بیش‌ترین میزان غلظت در شرایط کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس بود. در غلظت‌های بالاتر، میزان غلظت کلروفیل کاهش یافت به‌طوری‌که در شرایط عدم تنش خشکی تفاوت معنی‌داری بین عدم کاربرد نانوذرات با کاربرد نانوذرات در غلظت‌های ۷۰۰، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ مشاهده نشد؛ اما در تنش خشکی ملایم و شدید، بالاترین غلظت کلروفیل‌ها در دو غلظت ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس مشاهده شد (جدول ۴)؛ بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در شرایط عدم تنش غلظت کم نانوذرات سیلیس و در شرایط تنش خشکی غلظت‌های بالاتر نانوذرات اثر مثبت بر غلظت کلروفیل‌ها خواهند داشت.

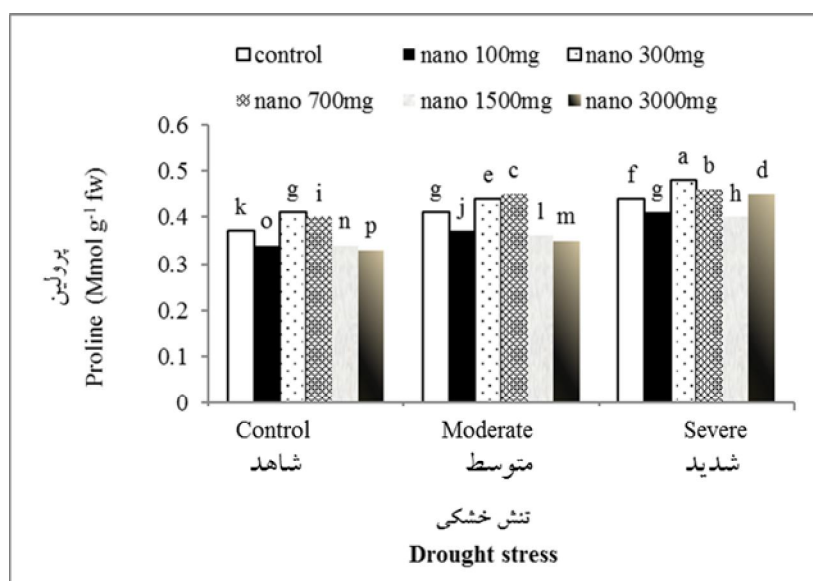


شکل ۱- مقایسه میانگین غلظت کربوهیدرات در گیاه بنه تحت تأثیر تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس (حروف متفاوت در بالای ستون‌ها اختلاف معنی‌دار تیمارها بر اساس آزمون توکی در سطح ۰.۰۵٪ را نشان می‌دهد).

Figure 1. Mean comparison of carbohydrate content in *Pistacia atlantica* induced by drought stress and SiO₂ nanoparticle (different letters on the top of the bars indicate significant difference at P<0.05 by Tukey).

میزان پرولین در بنه را به دنبال داشت. بالاترین میزان غلظت پرولین با ۰/۴۸ میکرومول بر گرم وزن تر در تیمار تنش شدید و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات سیلیس حاصل شد (شکل ۲). کم‌ترین میزان پرولین نیز در شرایط عدم تنش و کاربرد ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات سیلیس مشاهده گردید.

اثر برهمکنش تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس بر غلظت پرولین در نهال‌های بنه: کاربرد نانوذرات سیلیسیم افزایش میزان غلظت پرولین در گیاه را به همراه داشت که البته بیش‌ترین اثر نانوذرات تا غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات سیلیسیم مشاهده گردید. هم‌چنین تنش خشکی نیز افزایش

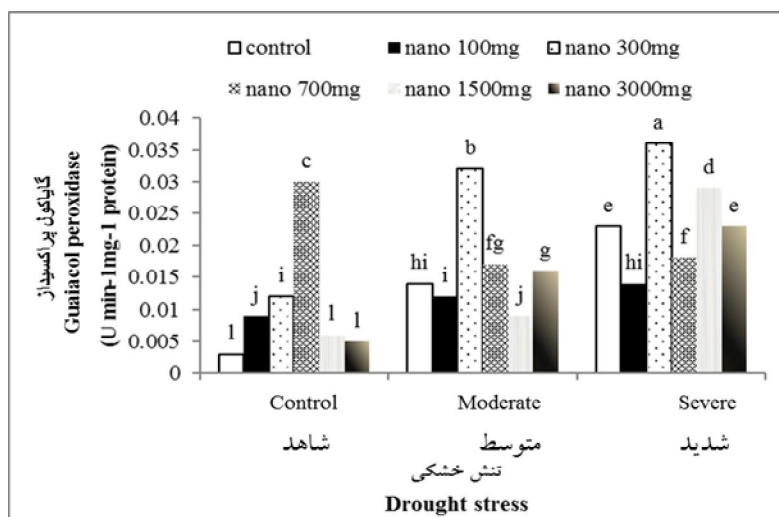


شکل ۲- مقایسه میانگین غلظت پرولین در گیاه بنه تحت تأثیر تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس (حروف متفاوت در بالای ستون‌ها اختلاف معنی‌دار تیمارها بر اساس آزمون توکی در سطح ۵٪ را نشان می‌دهد).

Figure 2. Mean comparison of proline content in *Pistacia atlantica* induced by drought stress and SiO₂ nanoparticle (different letters on the top of the bars indicate significant difference at P<0.05 by Tukey).

گایاکول پراکسیداز در شرایط کاربرد نانوذرات سیلیس و تنش خشکی افزایش داشته است. البته، بررسی تیمارها نشان می‌دهد در شرایط عدم تنش تیمار ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات سیلیس بالاترین میزان فعالیت پراکسیداز (۰/۰۳) واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) را منجر شد ولی در شرایط تنش ملایم و تنش شدید سطوح ۳۰۰ میلی‌گرم نانوذرات سیلیس بالاترین فعالیت گایاکول پراکسیداز را نشان داد (شکل ۳).

اثر برهمکنش تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس بر گایاکول پراکسیداز در نهال‌های بنه: اثر تیمار تنش خشکی با نانوذرات سیلیس بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی پراکسیداز گایاکول در سطح ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۳). بالاترین میزان فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (۰/۰۳۶) واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه) در تیمار تنش شدید و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس مشاهده گردید (شکل ۳). نتایج آزمایش نشان داد که فعالیت

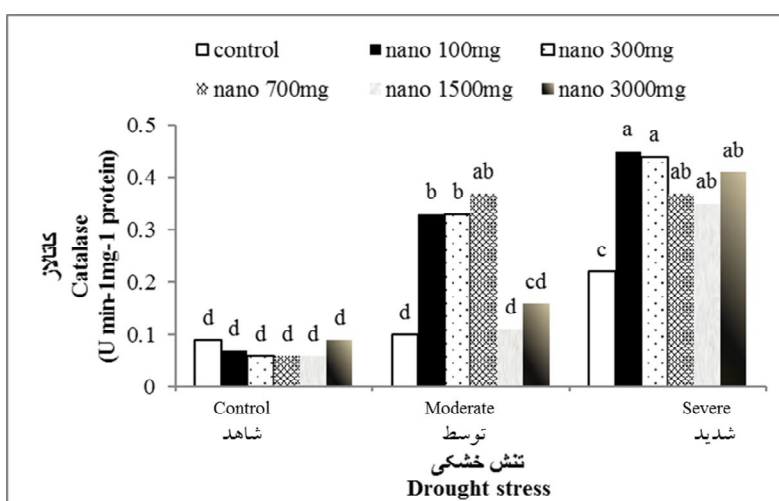


شکل ۳- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در گیاه بنه تحت تأثیر تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس (حروف متفاوت در بالای ستون‌ها اختلاف معنی‌دار تیمارها بر اساس آزمون توکی در سطح ۵٪ را نشان می‌دهد).

Figure 3. Mean comparison of the enzyme guaiacol peroxidase activity in *Pistacia atlantica* induced by drought stress and SiO₂ nanoparticle (different letters on the top of the bars indicate significant difference at P<0.05 by Tukey).

مشاهده گردید. البته، در شرایط تنش شدید بین غلظت‌های به‌کار رفته نانوذرات سیلیس اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد (شکل ۴). همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در شرایط عدم تنش کاربرد نانوذرات تأثیر کمی بر افزایش فعالیت کاتالاز داشته ولی در شرایط تنش خشکی چه ملایم و چه شدید نانوذرات سیلیس افزایش فعالیت کاتالاز را به دنبال داشت.

اثر برهمکنش تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس بر فعالیت آنزیم کاتالاز در نهال‌های بنه: میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه بنه تحت تأثیر تیمارهای مختلف آزمایش بین ۰/۰۶ تا ۰/۴۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه اندازه‌گیری شد (شکل ۴). بالاترین میزان فعالیت کاتالاز با ۰/۴۵ واحد بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه در تیمار تنش شدید و کاربرد ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیس



شکل ۴- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز در گیاه بنه تحت تأثیر تنش خشکی و کاربرد نانوذرات سیلیس (حروف متفاوت در بالای ستون‌ها اختلاف معنی‌دار تیمارها بر اساس آزمون توکی در سطح ۵٪ را نشان می‌دهد).

Figure 4. Mean comparison of catalase activity in *Pistacia atlantica* induced by drought stress and SiO₂ nanoparticle (different letters on the top of the bars indicate significant difference at P<0.05 by Tukey).

کاهش در مقدار هیدرات‌های کربن در مطالعه حاضر با نتایج ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) بر روی شاه‌بلوط و فراهت و همکاران (۲۰۰۷) در سرو زربین مطابقت داشت. علت غلظت پایین قند محلول تحت تیمار سیلیس را به فشار پایین اسمزی، تفاوت در حالت‌های مختلف تنش، طول و مدت تنش و گونه‌های مختلف نسبت دادند (۱۵ و ۴۲). یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که سیلیس از دستگاه فتوسنتزی محافظت نموده و در نتیجه سبب کاهش اثرات منفی کمبود آب می‌شود (۳۵). از مهم‌ترین دلایل افزایش هیدرات‌های کربن تحت تنش خشکی، افزایش نسبت ساکارز به نشاسته، تخریب نشاسته و در نهایت کاهش انتقال ساکارز به خارج از برگ گونه‌های مختلف که منجر به افزایش قند محلول می‌گردد. چنین حالتی هم در تنش خشکی کوتاه‌مدت و هم بلندمدت گزارش گردید (۳۹).

علی‌رغم افزایش مقدار پرولین کل در گیاهان تحت تأثیر نانوذرات سیلیس، اما سازوکارهای مؤثر در این زمینه هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. نتایج سچین و همکاران (۲۰۰۶) و دیتماروا و همکاران (۲۰۰۹) بر روی نوتل نروژ (*Picea abies*) و یافته‌های کروسبول و همکاران (۲۰۰۹) نشان از افزایش این ماده در چینی‌جا‌های گیاهی داشتند. افزایش پرولین در گونه‌های زراعی همانند گیاه نخود و آفتابگردان تحت تیمار نانو و تنش خشکی احتمالاً به دلیل تنظیم اسمزی مؤثرتر بوده و به‌عنوان تابعی از غلظت بالای پرولین آن‌ها می‌باشد که بخشی از مکانیسم تحمل به تنش خشکی محسوب می‌شود (۱۲ و ۱۴).

آنزیم پراکسیداز حساس‌ترین آنزیم نسبت به تنش خشکی است (۱۰). در اثر تنش خشکی غشای پلاسمایی سلول‌ها آسیب می‌بیند که در این حالت یکی از مکانیسم‌هایی که از غشا محافظت می‌کند،

تنش خشکی و کم‌آبی از جمله مهم‌ترین تنش‌های تأثیرگذار بر رشد و عملکرد گیاهان به‌ویژه نهال‌ها می‌باشد. بعد از اعمال تنش، علائم آن بلافاصله در گیاه ظاهر نمی‌شود؛ زیرا مکانیسم‌های دفاعی و حفاظتی برای کاهش یا توقف اختلالات شیمیایی و فیزیولوژیکی در داخل سلول به‌کار می‌رود (۲۱). کاهش در مقدار رنگدانه‌های کلروفیل برگ در اثر اعمال نانوذرات سیلیس و تنش خشکی هم در گونه‌های زراعی و هم درختی توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است. به‌عنوان مثال، سیلوا و همکاران (۲۰۱۲) با اعمال سیلیس بر گوجه‌فرنگی گزارش کردند که مقدار کلروفیل به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (۳۵). لیو و همکاران (۲۰۱۱) و امینی و حداد (۲۰۱۳) کاهش رنگدانه‌های کلروفیلی و کاروتنوئید در اثر اعمال تنش خشکی در شش گونه گیاهی چوبی و نیز نقش رنگدانه‌های کلروفیلی در تنش اکسیداتیوی را گزارش کردند که با نتایج مطالعه حاضر هماهنگ است (۳ و ۲۷). کاهش کلروفیل تحت تنش خشکی عمدتاً به دلیل آسیب کلروپلاست توسط گونه‌های فعال اکسیژن است (۲۸). کاروتنوئیدها می‌توانند طول‌موج‌های کوتاه نور را دریافت کنند، پس کاهش کاروتنوئیدها تحت تنش خشکی می‌تواند به‌علت تبدیل آب به هورمون آبسزیک اسید باشد. مقدار این هورمون عموماً در تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد. هم‌چنین، پژوهشگران دریافته‌اند که تنش خشکی پتانسیل آب برگ کاهش یافته، در نتیجه هورمون‌هایی مانند اتیلن و آبسزیک اسید افزایش می‌یابد و به دنبال آن فعالیت کلروفیل‌از که عامل اصلی تجزیه کلروفیل است به‌طور ناگهانی زیاد می‌شود (۲). علاوه بر این، در مورد تیمار نانوذرات ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش میزان کلروفیل a می‌تواند به افزایش میزان آنزیم پراکسیداز ارتباط داشته باشد، زیرا آنزیم پراکسیداز مانع تخریب این نوع کلروفیل می‌شود (۶).

نتیجه‌گیری کلی

استفاده از فن‌آوری‌های نوین همانند نانو ذرات می‌تواند کمک شایانی در انعطاف‌پذیری و افزایش مقاومت گیاهان به‌ویژه گیاهان چوبی نسبت به تنش‌های محیطی نماید. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد که نانوذرات سیلیس اثر مثبت و فزاینده‌ای بر روی انواع کلروفیل و کاروتنوئید تحت تنش خشکی دارد. غلظت‌های ۳۰۰، ۷۰۰ و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در مقایسه با سایر غلظت‌ها بر روی بسیاری از صفات اثر بهتری داشته‌اند. کاهش مقدار انواع کلروفیل و کاروتنوئید و کربوهیدرات تحت تنش خشکی منجر به افزایش حساسیت گونه بنه به تنش خشکی می‌شود. با توجه به نبود دانش پایه‌ای درباره مکانیسم‌های مقاومتی گونه‌های بومی جنگلی در پاسخ به نانوذرات، این پژوهش کمک فراوانی به توسعه دانش نانوذرات در گیاهان چوبی خواهد نمود. مطالعات در مورد استفاده از نانوذرات سیلیس برای دوره‌های طولانی‌تر و یا استفاده از سایر ذرات نانو و گونه‌های دیگر پیشنهاد می‌شود که می‌تواند راه هدفمندی برای یافتن نتایج مستدل که توجیه اقتصادی مناسبی در تولید نهال‌های مقاوم به خشکی داشته باشد را فراهم نماید.

افزایش میزان آنزیم‌هایی همانند پراکسیداز و کاتالاز است. در این پژوهش با اعمال تیمار نانو سیلیس و نیز تنش خشکی میزان فعالیت این آنزیم در برگ افزایش یافت که با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده بر روی افرا شیردار، زیتون، درخت کائوچو و نوعی صنوبر (*Populus cathayana*) (۳، ۶، ۳۸ و ۴۰). سیلیس سبب افزایش فعالیت پراکسیداز در دیواره سلولی گونه زراعی کلزا و گیاه برنج شد (۱۹ و ۲۵) که در راستای نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. افزایش فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و کاتالاز در اثر تیمار سیلیس تحت تنش خشکی به کاهش تنفس نوری و کاهش نقطه جبران CO_2 کمک می‌کند. به‌نظر می‌رسد پاسخ مختلف آنزیمی آنتی‌اکسیدان‌ها به تنش و عملکرد سیلیس به‌شدت تنش خشکی بستگی دارد (۱۷). نتایج این پژوهش با مطالعات لی و همکاران (۲۰۰۷) بر روی نوعی صنوبر (*Populus przewalskii*) و با نتایج لوم و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت داشت (۲۹). مقاومت گیاه به عوامل تنش‌زای محیطی احتمالاً با ظرفیت و افزایش سطح ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مربوط است که ممکن است از آسیب تنش خشکی و تنش اکسیداتیو جلوگیری کند (۷).

منابع

1. Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. Methods in Enzymology. 105: 121-126.
2. Allen, D.J., Nogues, S., and Baker, N.R. 1998. Ozone depletion and increased UV-B radiation: is there a real threat to photosynthesis? J. of Experimental Botany. 49: 1775-1788.
3. Amini, Z., and Haddad, R. 2013. The role of photosynthetic pigments and antioxidant enzymes against oxidative stress. J. of Cellular and Molecular Research (Iranian J. of Biology). 26: 3. 251-264. (In Persian)
4. Amiri, A., Bagheri, A., khaje, M., Najafabadi Pour, F., and Yadollahi, P. 2014. Eeffect of silicone foliar application on yield and antioxidant enzymes activity of safflower under limited irrigation conditions. J. of Crop Production Research. 5: 4. 361-373. (In Persian)
5. Ashkavand, P., Tabari, M., Zarafshar, M., Tomaskova, I., and Struve, D. 2015. Effect of Sio_2 nanoparticles on drought resistance in hawthorn seedlings. Lesne Prace Badawcze/Forest Research Papers Grudzien. 76: 4. 350-359.
6. Asgarpour, E., Azadfar, D., and Saeedi, Z. 2017. Evaluation of *Acer cappadocicum* Gled. seedlings to drought stress. J. of Plant Researches. 30: 10. 1-11. (In Persian)

7. Baroniya, S.S., Kataria, S., Pandey, G.P., and Guruprasad, K.N. 2012. Intraspecific variations in antioxidant defense responses and sensitivity of soybean varieties to ambient UV radiation. *Acta Physiol Plant.* 35: 5. 1521-1530.
8. Bates, L.S., Walderon, R.P., and Teare, J.D. 1973. Rapid determination of free prolin for water stress studies. *Plant and Soil.* 39: 205-208.
9. Bolton, D.K., and Friedl, M.K. 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology.* 173: 74-84.
10. Castillo, F.J. 1986. Extracellular peroxidases as markers of stress? P 419-426. In: H. Greppin, C. Penel, and T. Gaspar Eds. *Molecular and physiological aspects of plant peroxidases.* University of Geneva. Geneva.
11. Chance, B., and Maehly, A.C. 1955. Assay of catalases and peroxidase. *Methods in Enzymology.* 2: 764-775.
12. Cechin, I., Rossi, S.C., Oliveira, V.C., and Fumis, T.F. 2006. Photosynthetic responses and proline content of mature and young leaves of sunflower plants under water deficit. *Photosynthetica.* 44: 1. 143-146.
13. Crusciol, C.A.C., Pulz, A.L., Lemos, L.B., Soratto, R.P., and Lima, G.P.P. 2009. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. *Crop Science.* 49: 949-954.
14. Ditmarova, L., Kurjak, D., Palmroth, S., Kmet, J., and Strelcova, K. 2009. Physiological responses of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings to drought stress. *Tree Physiology.* 30: 205-21.
15. Farahat, M.M., Soad Ibrahim, M.M., Taha, L.S., and Quesni, E.M. 2007. Response of vegetative growth and some chemical constituents of *Cupressus sempervirens* L. to foliar application of ascorbic acid and zinc at Nubaria. *World J. of Agriculture Science.* 3: 4. 496-502.
16. Ghahramany, L., Saeidizadeh, F., and Ghazanfari, H. 2016. Response of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) to resin exploitation. *J. of Wood & Forest Science and Technology.* 23: 2. 25-44. (In Persian)
17. Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., and Zhang, C.H. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science.* 169: 313-321.
18. Gunes, A., Pilbeam, D.J., Inal, A., Bagci, E.G. and Coban, S. 2007. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. *J. of Plant Interactions.* 2: 2. 105-113.
19. Hashemi, A., Abdolzadeh, A., and Sadeghipour, H.R. 2010. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. *Soil Science and Plant Nutrition.* 56: 244-253. (In Persian)
20. Hashempour, F., Rostami Shahraji, T., Assareh, M.H., and Shariat, A. 2011. Impact of drought stress on some physiological traits in five Eucalypt species. *Iranian J. of Forest and Poplar Research.* 19: 2. 222-233. (In Persian)
21. Hekmat Shoar, H. 1994. *Physiology of Agronomic Plant in Difficult Condition.* Hekmat Shoar Publication. 251p. (In Persian)
22. Ilam Department of Natural Forest and Watershed. 2016. <https://ilam.frw.ir/00/Fa/StaticPages/Page.aspx?tid=1689>.
23. Khazaei, A., Saboori, A., Sadat Shebar, Z., and Shahbazi, M. 2016. Evaluation of grain yield of cultivars and promising lines of grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using of drought tolerance indices. *Seed and Plant Production.* 32: 1. 99-118. (In Persian)
24. Krause, G.H., and Weiss, E. 1988. The photosynthetic apparatus and chlorophyll fluorescence. An introduction. P 3-11. In: H.K. Lichtenthaler (Eds). *Applications of chlorophyll fluorescence in photosynthesis research stress physiology, hydrobiology and remote sensing.* Springer. Dordrecht. *Acta Physiologiae Plantarum.* 29: 519-526.

25. Liang, Y. 1999. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil*. 209: 217-224.
26. Lichtenthaler, H.K., and Wellburn, A.R. 1985. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 11: 591-592.
27. Liu, C., Liu, Y., Guo, K., Fana, D., Li, G., Zheng, Y., Yu, L., and Yang, R. 2011. Effect of drought on pigments, osmotic adjustment and antioxidant enzymes in six woody plant species in karst habitats of southwestern China. *Environmental and Experimental Botany*. 71: 174-183.
28. Manivannan, P., Abdul Jaleel, C., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., Lakshmanan, G.M.A., and Panneerselvam, R. 2007. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 59: 141-149.
29. Mirzaei, J., and Karamshahi, A. 2015. Effects of drought stress on growth and physiological characteristics of *Pistacia atlantica* seedlings. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 22: 1. 31-43. (In Persian)
30. Mirzaei, J., and Yousefzadeh, H. 2013. Peroxidase, superoxide dismutase and catalase activities of the *Pistacia khinjuk* seedlings under drought stress. *Ecopersia*. 1: 4. 329-337.
31. Parvin, P., Khezri, M., and Tavasoliyan, I. 2015. Effects of drought stress on some morphological, physiological and biochemical parameters of Persian walnut seedling. *J. Plant Products Research*. 21: 3. 1-25. (In Persian)
32. Saeidi, M., Moradi, F., Ahmadi, A., Spehri, R., Najafian, G., and Shabani, A. 2010. The effects of terminal water stress on physiological characteristics and sink-source relations in two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *J. of Agricultural Sciences of Iran*. 4: 13. 392-408. (In Persian)
33. Schlegel, H.G. 1956. Die verwertung organischer sauren durch chlorella in lincht. *Planta*. 47: 510-526.
34. Shamsi, K. 2010. The effects of drought stress on yield, relative water content, proline, soluble carbohydrates and chlorophyll of bread wheat cultivars. *J. of Animal and Plant Sciences*. 8: 3. 1051- 1060.
35. Silva, O.N., Lobato, A.K.S., Avila, F.W., Costa, R.C.L., Oliveira Neto, C.F., Santos Filho, B.G., Filho, A.P.M., Lemos, R.P., Pinho, J.M., Medeiros, M.B.C.L., Cardoso, M.S., and Andrade, I.P. 2012. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by the leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. *Plant Soil and Environment*. 58: 11. 481-486.
36. Tubana, B.S., and Heckman, J.R. 2015. Silicon in Soils and Plants. P 7-51. In: F. Rodrigues and L. Datnoff (Eds). *Silicon and Plant Diseases*. Springer. Cham.
37. Valladares, F., Skillman, J.B., and Percy, R.D. 2002. Convergence in light capture efficiencies among tropical forest understory plants with contrasting crown architectures: a case of morphological compensation. *American J. of Botany*. 89: 1275-1284.
38. Wang, L.F. 2014. Physiological and molecular responses to drought stress in rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Plant Physiology and Biochemistry*. 83: 243-249.
39. Widiastuti, N., Wu, H., Ang, M., and Zhang, D.K. 2008. The potential application of natural zeolite for grey water treatment. *Desalination J*. 218: 271-280.
40. Xu, X., Peng, G., Wu, Ch., Korpelainen, H., Li, C. 2008. Drought inhibits photosynthetic capacity more in females than in males of *Populus cathayana*. *Tree Physiology*. 28: 1751-1759.

41. Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N., and Prabu, P. 2011. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea Mays* L.). *International J. of Green Nanotechnology*. 3: 180-190.
42. Zhang, C.H., Moutinho-Pereira, J.M., Correia, C., Coutinho, J., Goncalves, A., Guedes, A., and Gomes-Laranjo, A. 2013. Foliar application of Sili-K® increases chestnut (*Castanea spp.*) growth and photosynthesis, simultaneously increasing susceptibility to water deficit. *Plant Soil*. 365: 211-225.



Effect of nano SiO₂ on physiological features of *Pistacia atlantica* subsp. *mutica* under drought stress

K. Mahmoodi¹, Y. Alizadeh², H. Abdul-Hamid³ and *H.R. Naji⁴

¹M.Sc. Student, Dept. of Forest Sciences, Ilam University, Ilam, Iran,

²Assistant Prof., Dept. of Agronomy, Ilam University, Ilam, Iran,

³Professor, Institute of Tropical Forestry and Forest Products (INTROP), University Putra Malaysia (UPM), Malaysia,

⁴Assistant Prof., Dept. of Forest Sciences, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 09.25.2017; Accepted: 12.30.2019

Abstract

Background and Objectives: It is of importance to find drought-tolerant tree species with the aim of reviving Zagros forests. There are not enough researches about the effect of nanoparticles on the woody plants especially on their physiological features, while most of the researches have focused on herbaceous and crop plants. Therefore, in the current research, we investigated the effect of nano SiO₂ on wild pistachio (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*) seedlings to understand the plant reaction to tension in order to find a drought-tolerant plant for rehabilitation of Zagros forests.

Materials and Methods: The experiment was a factorial experiment based on completely randomized design with 126 seedlings, three replicates, six treatments of nano SiO₂ (control, 100, 300, 700, 1500, and 3000 mg.l⁻¹) for 30 days and at three levels of drought stresses (control, every other day of irrigation; moderate, every four days of irrigation; and severe drought, with no irrigation). At the end, the physiological characteristics of chlorophyll a, b, total, carotenoid, carbohydrate, proline content, and antioxidant enzymes of guaiacol peroxidase and catalase were analysed in seedlings leaves.

Results: The results showed that using nano SiO₂ increased different kinds of chlorophylls, carotenoid, proline content, carbohydrate, and antioxidant enzymes under drought stress. In fact the seedlings reacted differently to nano SiO₂ treatments that the highest amount of carbohydrates and catalase were observed in 700 mg.l⁻¹; chlorophyll a, b, total and carotenoid in 3000 mg.l⁻¹, and proline and peroxidase in 300 mg.l⁻¹. Furthermore, the different levels of drought stress reduced chlorophylls and carotenoid; while increased soluble carbohydrates, proline, and antioxidant enzymes.

Conclusion: It can be concluded that the most physiological traits were increased under drought stress and the SiO₂ nanoparticles had positive effect on traits of different types of chlorophyll and carotenoids. Concentrations of 300, 700 and 3000 mg.l⁻¹ had a better effect on many of the physiological traits than the others. Reducing chlorophylls and carotenoids and increasing carbohydrate, proline and antioxidant enzymes are occurred in plants to tolerate the drought stress. Due to the lack of basic information about the resistance mechanism in endemic tree species from Zagros forests in response to nanoparticles, this study will be a great assistance to develop nano technology in woody plants. It is suggested to study the effect of SiO₂ nanoparticles for longer periods or on some more species that could be a suitable way to find better results. These results may lead into economical production of drought tolerant seedlings.

Keywords: Chlorophyll, Drought tolerance, Leaf physiological features, Pistachio, SiO₂ nanoparticles

*Corresponding author: h.naji@ilam.ac.ir