



دانشگاه گمرک‌های ایران

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل
جلد بیستم و سوم، شماره اول، ۱۳۹۵
<http://jwfst.gau.ac.ir>

اثر نانوذرات سیلیکا (SiO₂ NPs) روی صفات رویشی و فیزیولوژی نهال زالک زرد (*Crataegus aronia* L.)

پیمان اشکانوند^{۱*}، مسعود طبری کوچکسرای^۲، مهرداد زرافشار^۳ و احسان قنبری^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، استاد، گروه جنگلداری،

دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۳ دانش‌آموخته دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی،

دانشگاه تربیت مدرس، ^۴ دانشجوی دکتری، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۱/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۲۰

چکیده

سابقه و هدف: به منظور بهره‌گیری از علم نوین نانو تکنولوژی و خصوصیات منحصر به فرد نانوذرات در علوم گیاهی، تحقیقات دقیق و بنیادین لازم است این در حالی است که اطلاعات دقیقی در مورد تأثیر نانو ذرات به ویژه نانوذرات سیلیکا بر گیاهان چوبی وجود ندارد و بیشتر تحقیقات بر گیاهان علفی و زراعی معطوف شده است. در این پژوهش به مدت ۴۵ روز تأثیر نانوذرات سیلیکا در بهبود صفات رویشی و فیزیولوژی نهال‌های زالک زرد (*Crataegus aronia* L.)، به عنوان یکی از گونه‌های مهم رویشگاه زاگرس، مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: برای رسیدن به این مهم یک آزمایش گلخانه‌ای به صورت طرح کاملاً تصادفی در ۴ سطح تیمار با ۵ تکرار طراحی و اجرا گردید. تیمارهای اعمال شده شامل سطوح شاهد به صورت آبیاری با آب معمولی (بدون حضور نانوسیلیکا) و آبیاری با غلظت‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات سیلیکا بود که هر سه روز یکبار بر اساس ظرفیت زراعی صورت گرفت. بررسی روند تبدلات گازی در طول آزمایش (نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و نرخ تعرق) به همراه تغییرات

*مسئول مکاتبه: mtabari@modares.ac.ir

فیزیولوژیک (محتوی نسبی رطوبت در برگ و پتانسیل آبی در آوندها) و تخصیص بیوماس نهال‌ها (در قسمت ریشه، ساقه و برگ) در پایان آزمایش به‌عنوان شاخص مورد توجه قرار گرفت. با تهیه قطعات کوچکی از ریشه نهال‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای مطالعه میزان حضور و چسبندگی نانوذرات بر اپیدرم ریشه نیز استفاده شد.

یافته‌ها: در پایان آزمایش نتایج نشان داد که اگرچه تغذیه نهال‌های زلزک با نانوذرات سیلیکا سبب کاهش جزئی پتانسیل آبی نهال‌ها شد (منفی‌تر)، ولی از لحاظ محتوای نسبی رطوبت در برگ بین تیمارهای اعمال شده اختلاف معنی‌دار آماری مشاهده نشد. بررسی پارامترهای تبادلات گازی نشان داد که میزان فتوسنتز در نهال‌های تیمار شده با نانوذرات سیلیکا افزایش معنی‌دار یافته است که این موضوع نیز به نوبه خود باعث افزایش بیوماس نهال و به‌ویژه بیوماس ریشه گردید، به‌طوری که بیوماس کل نهال در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به شاهد حدود ۴۰ درصد افزایش داشت. بررسی میکروگراف‌های تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی نیز چسبندگی نانوذرات سیلیکا را در سطح خارجی ریشه تأیید کرد.

نتیجه‌گیری: در مجموع، می‌توان اذعان کرد که استفاده از نانوذرات سیلیکا در این پژوهش بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیک و افزایش بیوماس کل نهال‌های زلزک را موجب شد ولی بی‌شک برای درک مکانیسم آن مطالعات تکمیلی الزامی است لذا مطالعات ژنومیک از قبیل آنالیز بیان ژن و پروتئین‌ها می‌تواند مورد توجه متخصصین علوم گیاهی قرار بگیرد تا در نهایت بتوان تصمیم قطعی را ارائه کرد.

کلمات کلیدی: بیوماس، پتانسیل آبی، تبادلات گازی، محتوای نسبی رطوبت، نانوذرات

مقدمه

موادی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها این مقدار باشد در گروه نانو ذرات طبقه‌بندی می‌شود. اندازه کوچک نانوذرات به آن‌ها اجازه می‌دهد که از لحاظ فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خصوصیات ویژه و منحصر به‌فردی را از خود نشان دهند و فرایندها و اثرات متفاوتی نسبت به ذرات درشت دانه ایجاد نمایند (۲۰). استفاده از نانوذرات در ارتباط با زمینه‌های کشاورزی بسیار جدید است و نیاز به اکتشاف بیشتری دارد طوری که عملکرد نانوذرات در سطح مولکولی در سیستم‌های بیولوژیکی تا حد زیادی ناشناخته مانده است. همچنین درک کامل از نقش نانوذرات

مهندسی در فیزیولوژی گیاهی در سطح مولکولی هنوز ناقص است (۲۸). مطالعات اولیه نشان داده‌اند که نانو ذرات در گسترش تولید بذر و رشد و حمایت گیاه، تشخیص بیماری، تشخیص باقی‌مانده علف‌کش‌ها دارای پتانسیل بالایی می‌باشند (۱۴) و به‌طور کلی می‌توانند اثرات مثبت و یا در شرایطی اثرات منفی (از جمله بیماری‌زایی، کاهش رشد و تأخیر در جوانه‌زنی) در گیاهان داشته باشند (۲۱).

سیلیکون بعد از اکسیژن فراوان‌ترین عنصر در خاک است. دی‌اکسید سیلیکون ۵۰ تا ۷۰ درصد وزن خاک را تشکیل می‌دهد (۱۵). اگرچه سیلیکون به‌طور معمول کمتر در دسترس گیاه است اما در محلول خاک به‌صورت سیلیس حل شده یا مونوسیلیسیک اسید (H_4SiO_4) وجود دارد و با همین فرم توسط گیاهان جذب می‌شود (۴ و ۲۶)، سیلیکون در ریشه تبدیل به سیلیسیک اسید ($Si(OH)_4$) شده و به‌دلیل شرکت در جریان تعرق به‌صورت ژل سیلیکا ($SiO_2.nH_2O$) در برگ انباشته می‌شود (۲۶). سیلیکا هنوز به‌عنوان یک ماده مغذی ضروری برای رشد گیاه شناخته نشده در حالی‌که اثرات مفید آن از جمله بر رشد، عملکرد و مقاومت در برابر تنش‌های زنده و غیره زنده در طیف گسترده‌ای از گونه‌های گیاهی به اثبات رسیده است (۳۰، ۲۸، ۲۳، ۵). سیلیکا به‌عنوان یک مانع فیزیکی مکانیک^۱ و رسوب روی دیواره‌های اپیدرمی و بافت‌های آوندی ساقه، غلاف برگ و پوست قرار گرفته (۲۸، ۲۲، ۱۵) و در تنظیم فعالیت‌های فیزیولوژی گیاهان نقش مهمی ایفا می‌کند (۳). همچنین به‌صورت کود شیمیایی و در مقیاس درشت دانه اثرات مثبت بر گیاهان دارد و سبب جلوگیری و یا تأخیر در پژمردگی برگ، مقاومت به یخ‌زدگی، بهبود در مصرف آب (۳۳) و اثرهای مخرب تنش‌های زنده (۱۶) و غیرزنده (۱۳) در گیاه می‌شود.

در سال‌های اخیر اثرات سیلیکا بر گیاه در مقیاس نانو نیز مورد توجه قرار گرفته است که عمده تحقیقات مرتبط با گونه‌های زراعی بوده و بسیار اندک به گونه‌های جنگلی پرداخته شده است. از جمله مطالعه یاواکومار و همکاران (۲۰۱۱) بر گیاه ذرت (*Zea mays L.*) در مدت ۶۵ روز نشان داد که اعمال نانوسیلیکا به‌صورت پودر و مخلوط با خاک گلدان‌ها باعث افزایش درصد جوانه‌زنی (۲ تا ۱۱ درصد)، ضریب بهره‌وری آب (بیشتر از ۵۳ درصد) و میزان کلروفیل (۱۳ تا ۱۷ درصد) شده است و تمامی پارامترهای کمی گیاه نسبت به کنترل و تیمار سیلیکا درشت دانه افزایش نشان داد (۳۳). حقیقی و همکاران (۲۰۱۲) با اعمال نانوذرات سیلیکا بر بذر گیاه گوجه فرنگی تحت تنش شوری و

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۲۳)، شماره (۱) ۱۳۹۵

بررسی آن در مدت ۱۰ روز به این نتیجه رسیدند که نانوسیلیکون می‌تواند اثرهای منفی و مخرب شوری بر درصد جوانه‌زنی و طول و وزن ریشه را بهبود بخشد (۹). همچنین در سایر مطالعات، مشاهده شده است که نانوذرات سیلیکا توانست موجب افزایش جوانه‌زنی بذر (۱۳، ۲۸)، ارتفاع ساقه، قطر یقه ریشه، طول ریشه، تعداد ریشه اصلی (۳) و بهبود اثرات مخرب تنش غرقاب (۳۰) شود. تحقیقات حقیقی و پسرکلی (۲۰۱۳) روی گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*)، نشان داد که سیلیکا در مقیاس درشت دانه و نانوذره سبب بهبود رشد، فتوسنتز، محتوی نسبی رطوبت و میزان کلروفیل گیاه تحت تنش شوری شدند (۸). در رابطه با اثر سمیت نانوذرات سیلیکا تحقیقی توسط سلومبرگ و سپوینفچ (۲۰۱۲) انجام شد و معلوم شد که نانوذرات سیلیکون تا غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر اثر سمی روی گیاه *Arabidopsis thaliana* نداشته است (۲۹). در پژوهشی دیگر زرافشار و همکاران (۲۰۱۵) با اعمال نانوذرات سیلیکا در غلظت‌های ۱۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی نهال‌های گلابی وحشی (*Pyrus biosseriana* Buhse.) و بررسی تخریب سلول گیاهی و القاء تنش اکسیداتیو ناشی از اعمال این نانو ذره، هیچ اثر بازدارنده‌ای که می‌توانست حاکی از سمیت این نانو ذره باشد را مشاهده نکردند (۳۴). لازم به ذکر است که با توجه به اثرات مثبت نانوذرات سیلیکون در بهبود عملکرد گونه‌های گیاهی، در ارتباط با توجیه اقتصادی آن در تحقیقات فوق بررسی لازم صورت نگرفته است. البته، گاهی اوقات به دلیل ارزش‌های بالا و منحصر به فرد نوع گونه، ممکن است هزینه‌های مورد نیاز تحت‌الشعاع تولید نهال و بهبود ظرفیت‌های آن قرار گیرد.

یکی از گونه‌های مورد استفاده در طرح‌های احیاء جنگل‌های مخروطی زاگرس و نیز بیشه زراعی (اگروفارستری)، زالزالک زرد (*Crataegus aronia* L.) است که به دلیل تولید میوه قابل مصرف و نیز اهمیتش به عنوان گونه پیش‌آهنگ و پرستار مورد توجه بخش‌های اجرایی و مردمی می‌باشد. این گونه به لحاظ ارزش‌های زینتی در باغات، مزارع، حاشیه جاده‌ها و فضای سبز شهری استان‌های غرب کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طب سنتی نیز از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است، طوری که از جوشانده برگ و پوست میوه آن برای درمان بیماری‌های قلبی - عروقی، دیابت، سرطان و غیره استفاده می‌شود (۱۲، ۱۹). افزایش ۱۸/۳۳ درصدی جوانه‌زنی زالزالک با استفاده از ترکیب اینوکولوم باکتریایی محرک رشد گیاهی (PGPRs) و استراتیفیکاسیون سرد و گرم در تحقیقات احمدلو و همکاران (۱) آمده است؛ و اشکاوند و همکاران (۲) دریافتند که خشکی ناگهانی (قطع یک‌باره آب) در زالزالک (*Crataegus aronia* L.) تبعات منفی بیشتری نسبت به گونه محلب (*Prunus mahaleb* L.) در

پیمان اشکاوند و همکاران

پی دارد. از آنجایی که در نهالستان‌های تولید نهال، نهال این گونه چند سال نیاز به پرورش داشته تا برای انتقال به عرصه احیایی آماده گردد از این رو در تحقیق حاضر از نانو ذرات سیلیکا (که برتری آن نسبت به ذرات درشت دانه در تحقیقات سوریاپرابها (۳۰) و یاواکومار (۳۳) به اثبات رسیده است) برای بررسی بهبود رشد و زی‌توده، و نیز پاسخ‌های فیزیولوژی این گونه در مرحله نهالی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این آزمایش در اسفند ماه ۱۳۹۱ (قبل از رویش و شکفتن جوانه‌ها) نهال‌های یک‌ساله همگن گونه زالزالک زرد (*C. aronia*) از نهالستان جنگلی شهرستان مریوان استان کردستان به گلخانه دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس منتقل و در گلدان‌های ۶ لیتری کاشته 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. به‌منظور شبیه‌سازی خاک گلدان‌ها با خاک نهالستان از خاک با ترکیب لومی - شنی - رسی (۱:۲:۱) با مشخصات اشاره شده در جدول ۱ استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده در تحقیق.

Table 1. Characteristics of nanoparticles are used in the study.

پتاسیم قابل جذب Exchangeable potassium (ppm)	فسفر قابل جذب Available phosphorus (ppm)	کربن آلی Organic carbon (%)	Hd پهنای بند	وزن مخصوص ظاهری Bulk density	درصد رس Clay (%)	درصد شن Sand (%)	درصد سیلت Silt (%)
274.6	30.33	0.875	8.04	1.26	26	46	28

در ادامه، اثر نانوذرات سیلیکا روی رشد و فیزیولوژی نهال‌های زالزالک در شرایط گلخانه در ماه‌های تیر و مرداد سال ۱۳۹۲ اجرا گردید. پس از تعیین بافت، وزن مخصوص ظاهری، رطوبت خاک گلدان و ترسیم منحنی رطوبتی خاک که رابطه بین پتانسیل آب خاک و رطوبت را مشخص می‌کند با استفاده از فرمول ساکسون و همکاران (۱۹۸۶) (رابطه ۱)، ظرفیت زراعی (FC) خاک، وزن مرجع که مجموعی از وزن خاک خشک داخل گلدان، وزن گلدان و وزن آب (برای پتانسیل در نقطه FC) است

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۲۳)، شماره (۱) ۱۳۹۵

تعیین شد تا میزان آبی که در قالب هر سطح تیمار به هر گلدان لازم است داده شود (با توجه به FC موردنظر) مشخص گردد (۲۵).

$$\Psi_m = A \theta_v^B \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه Ψ_m پتانسیل ماتریک خاک برحسب کیلو پاسکال، θ_v مقدار رطوبت حجمی خاک برحسب مترمکعب بر مترمکعب و A و B ضرایبی هستند که می‌توان آن‌ها را به ویژگی‌های خاک ارتباط داد.

$$A = \exp[-4.396 - 0.0715(c) - 4.88 \times 10^{-4}(s)^2 - 4.285 \times 10^{-5}(s)^2(c)]^{100}$$

$$B = -3.14 - 0.00222c^2 - 3.14 \times 10^{-5}s^2c$$

در روابط بالا \exp عدد نپر (۲/۷۱۸)، C درصد رس و S درصد شن خاک می‌باشد.

تیمارهای آزمایش شامل نانوذرات سیلیکون با غلظت‌های ۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر بر نهال‌های گونه زالزالک به صورت طرح کاملاً تصادفی بوده است. تیمار شاهد با آب معمولی و محلول‌های نانوذرات هر سه روز یکبار بر اساس ظرفیت زراعی طراحی شدند. برای هر تیمار ۵ نهال یکسان و همگن زالزالک در نظر گرفته شد. شروع اعمال تیمارها در اواخر تیر و طول دوره آزمایش ۴۵ روز بود. مشخصات نانوذرات مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات نانوذرات مورد استفاده در آزمایش تأثیر نانوذره سیلیکا روی نهال‌های زالزالک (*C. aronia*)

Table 2. Characteristics of nanoparticles are used in the study the effect of nanosilicon on hawthorn (*C. aronia*) seedling.

نانوذرات سیلیکا nano-silica	ساختار نانو Nanostructure
SiO ₂	فرمول شیمیایی Chemical formula
سفید	رنگ Color
White	مورفولوژی Morphology
بی‌شکل Amorphous	متوسط اندازه ذرات Size range
10 - 30 nm	مساحت سطح ویژه Specific surface area
180 - 270 m ² /g	درصد خلوص Purity
99.999%	

در انتهای آزمایش، حضور و چسبندگی نانوذرات سیلیکون روی سطح اپیدرم ریشه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. در طول آزمایش هر ۱۰ روز یک بار از هر تکرار ۶-۳ برگ از بالغ‌ترین و توسعه یافته‌ترین برگ از یک پنجم بالایی نهال (۷) میزان تعرق برگ^۱، هدایت روزنه‌ای^۲ و نرخ فتوسنتز خالص^۳ توسط دستگاه پرتابل اندازه‌گیری تبادلات گازی (Model LCpro+, ADC BioScientific Ltd., Hertfordshire, UK) ارزیابی شد. پارامترهای مورفولوژی از قبیل قطر و ارتفاع و همچنین رشد آن‌ها در سطح هر تیمار مورد توجه قرار گرفت. در پایان دوره آزمایش، پتانسیل آبی آوند چوبی سه نهال با استفاده از دستگاه (Pressure Chamber, Skye, SKPM 1400, UK) اندازه‌گیری شد. در ادامه، سه نهال از خاک خارج شد و پس از شستشوی خاک اطراف ریشه، عمق ریشه‌دوانی با استفاده از خط‌کش تا دقت میلی‌متر و حجم آن‌ها با استفاده از اختلاف حجم آب در لوله مدرج تا دقت میلی‌لیتر اندازه‌گیری گردید. سپس هر یک از اندام‌های نهال (ریشه، ساقه و برگ) در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شد و بیوماس کل، بیوماس ریشه، ساقه و برگ تعیین شد. محتوی نسبی رطوبت برگ^۴ با انتخاب جوان‌ترین برگ کاملاً باز شده از رابطه ۲ محاسبه گردید (۱۸، ۳۲). در این رابطه FW وزن برگ تازه، SW وزن آماس برگ و DW وزن برگ پس از خشک شدن است.

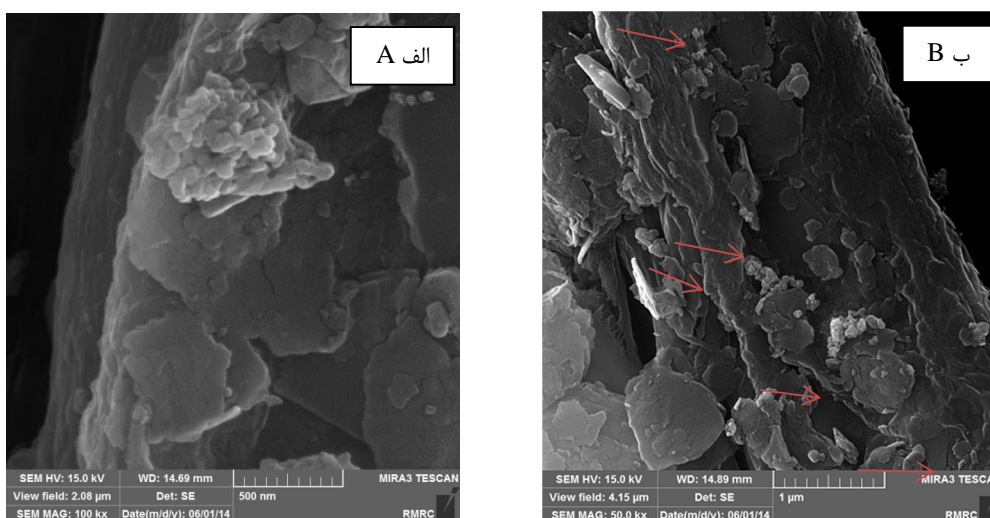
$$RWC = \frac{FW - DW}{SW - DW} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

تجزیه و تحلیل آماری: داده‌های به‌دست آمده از انتهای دوره و نمودارهای مربوطه در محیط نرم‌افزار EXCEL سازماندهی و ترسیم شد. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. داده‌های تبادلات گازی که در طول آزمایش و در روزهای مختلف ثبت شده بودند تحت طرح تکرار در زمان^۵ مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های کمی رشد، پتانسیل آبی و محتوی نسبی رطوبت برگ (RWC) پس از آزمون نرمالیتی و همگنی با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه تجزیه و تحلیل شد و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون Dunnett's T3 در سطح اطمینان ۵ درصد استفاده گردید.

-
- 1- Transpiration
 - 2- Stomata Conductance
 - 3- Net Photosynthesis Rate
 - 4- Relative Water Content
 - 5- Repeated measure

نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی: بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد روی ریشه نهال‌های کنترل هیچ‌گونه اثری از نانوذرات وجود ندارد در حالی‌که در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم نانوذرات، حضور و چسبندگی نانوذرات بر سطح خارجی ریشه مشهود است (شکل ۱).



شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، حضور و چسبندگی نانوذرات سیلیکون روی سطح اپیدرم ریشه نهال‌های زالزالک (*C. aronia*). (شکل الف) و (ب) به ترتیب نشان‌دهنده سطح اپیدرم ریشه نهال شاهد و تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد).

Figure 1. Scanning electron microscopy (SEM) images, The absence of nanoparticles on root epidermis in hawthorn (*C. aronia*) seedlings. ((A) and (B) are shown root epidermis in control and 100 mg.L⁻¹ treatment seedling Respectively).

بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در سطح اپیدرم ریشه، نهال‌های تیمار شده زالزالک زرد با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر از نانوذرات، حضور و چسبندگی نانوذرات مشهود بوده است. زرافشار و همکاران (۲۰۱۵) نیز حضور و چسبندگی نانوذرات سیلیکا در اپیدرم ریشه گلابی (*Pyrus biosseriana*) را مشاهده کردند (۳۴). سیگر و همکاران (۲۰۰۹) نیز چسبندگی نانوذرات بر سطح ریشه نهال‌های بید (*Salix spp.*) را گزارش کردند (۲۷). نانوذرات توسط ریشه‌های جانبی و موئین جذب شده و از طریق ساقه به برگ منتقل می‌شود که البته گاهی اوقات نانوذرات فقط

به صورت سطحی جذب ریشه می‌شوند (۱۷). لازم به ذکر است که، به طور کلی گیاهان قادر هستند بین ۱ تا ۱۰ درصد بیوماس خشک خود را به سیلیکون اختصاص دهند (۲۴).

پارامترهای رویشی: نتایج آزمون تجزیه واریانس یک طرفه نشان می‌دهد که از بین پارامترهای رویشی حجم ریشه، وزن خشک ریشه و بیوماس کل نهال تحت تأثیر تیمار نانوذرات سیلیکون قرار گرفتند (جدول ۳). نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون Dunnett's T3 نشان داد که وزن خشک کل در سطوح شاهد و ۱۰ میلی‌گرم با هم اختلافی نداشتند، اما سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم با هم و با بقیه تیمارها اختلاف معنادار داشته و سطح تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم دارای بیش‌ترین مقدار بود (شکل ۲). در تحقیق حاضر، نانوذرات سیلیکا روی اندازه‌های قطری و طولی نهال‌های زالک در طول دوره آزمایش اختلاف معنادار آماری نشان نداد. باو-شان و همکاران (۲۰۰۴) در آزمایشی به اثرات مثبت نانوذرات SiO_2 روی توسعه رشد و بهبود کیفیت نهال‌های *Larix olgensis* دست یافتند (۳). آن‌ها گزارش کردند که نانوذرات SiO_2 در غلظت $500 \mu\text{L.L}^{-1}$ موجب افزایش ارتفاع، قطر یقه، طول ریشه‌های اصلی و تعداد ریشه‌های جانبی نهال‌ها شد که در آزمایش حاضر نیز تأثیر فزاینده و معنادار نانوذرات سیلیکا بر حجم و بیوماس ریشه و همچنین بیوماس کل گیاه ثبت شد (شکل ۳). شکل ۳ نشان می‌دهد که تحت تأثیر نانوذرات سیلیکون حجم ریشه افزایش یافت، البته بین سطوح تیمار شاهد و ۱۰ میلی‌گرم اختلافی مشاهده نشد، در حالی که اختلاف بین سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم با شاهد معنادار بود. نانوذرات سیلیکا موجب افزایش وزن خشک اندام‌های مختلف نهال‌ها شد، اگرچه در بعضی سطوح، نسبت به شاهد تغییری مشاهده نشد. وزن خشک کل نهال در تیمارهای ۱۰۰، ۵۰ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات نسبت به شاهد به ترتیب ۴۰/۱۶، ۲۷/۲۹ و ۵/۶۳ درصد افزایش نشان داد، که با نتایج سایر محققان مطابقت دارد (۲۸، ۹، ۸). به طور مشابه، صدیقی و ال-وهبی (۲۰۱۴) نیز در مطالعه خود روی گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) گزارش کردند که نانو ذرات سیلیکا با غلظت ۸ گرم در لیتر باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه شده است (۲۸). البته چنانچه سیلیکون در زمان مناسب و با غلظت صحیح استفاده شود می‌تواند به طور قابل توجهی رشد گیاه را تنظیم نماید (۱۰).

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۲۳)، شماره (۱) ۱۳۹۵

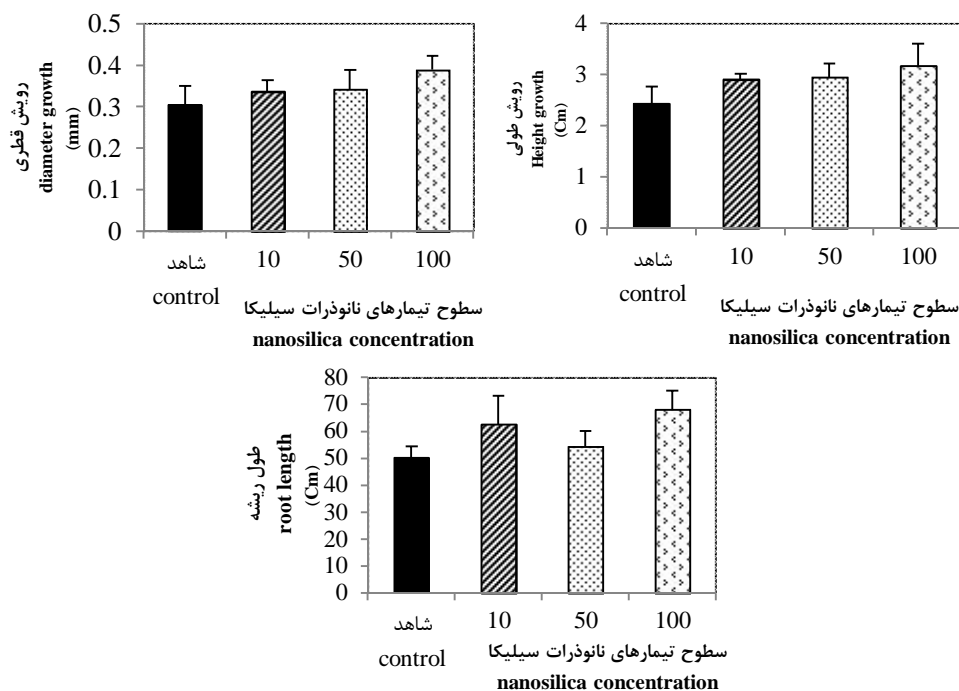
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس یک‌طرفه پارامترهای رویشی و پتانسیل آبی آوند چوبی در سطوح مختلف تیمار نانوذرات سیلیکا روی نهال *C. aronia*

Table 3. The one-way ANOVA results of growth parameters and water xylem potential in different concentrations of nanosilica on *C. aronia* seedlings.

P – value	F- value	درجه آزادی df	صفات	
0.267 ^{NS}	1.338	3	رویش قطری (mm) Diameter growth	پارامترهای رشد و مورفولوژی Growth and morphological parameters
0.378 ^{NS}	1.0433	3	رویش ارتفاعی (cm) Height growth	
0.077 ^{NS}	3.848	3	طول ریشه (cm) Root length	
0.034*	4.772	3	حجم ریشه (mL) Root volume	
0.009**	7.893	3	وزن خشک ریشه (g) Root biomass	
0.226 ^{NS}	1.979	3	وزن خشک ساقه (g) Stem biomass	
0.110 ^{NS}	11.787	3	وزن خشک برگ (g) Leaf biomass	
0.002**	13.976	3	وزن خشک کل (g) Total biomass	
0.000**	27.211	3	پتانسیل آبی (Mpa) xylem Water potential	پارامترهای فیزیولوژی Physiological parameters
0.084 ^{NS}	2.813	3	محتوای نسبی آب برگ (درصد) Relative water content	

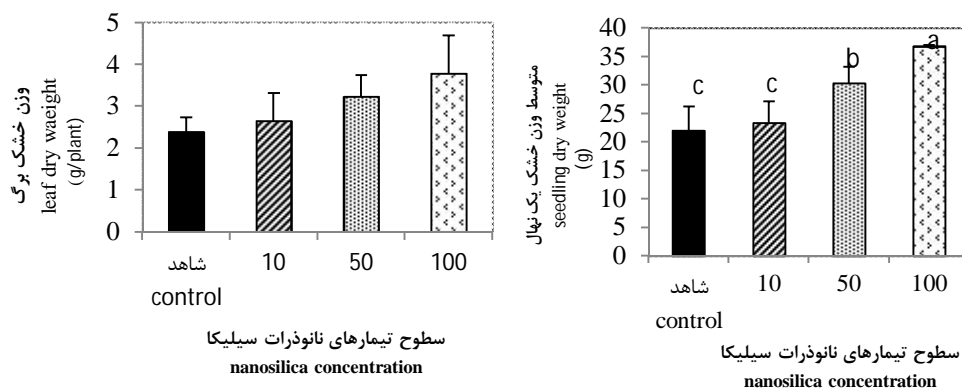
*** به ترتیب اثر معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد و NS اثر غیر معنی‌داری را نشان می‌دهند.

* and ** represents significant difference at 5% and 1% level respectively and NS represents not significant.



شکل ۳- تأثیر نانوذرات سیلیکا روی رویش قطری، رویش طولی و طول ریشه نهال‌های زالزالک (*C. aronia*).

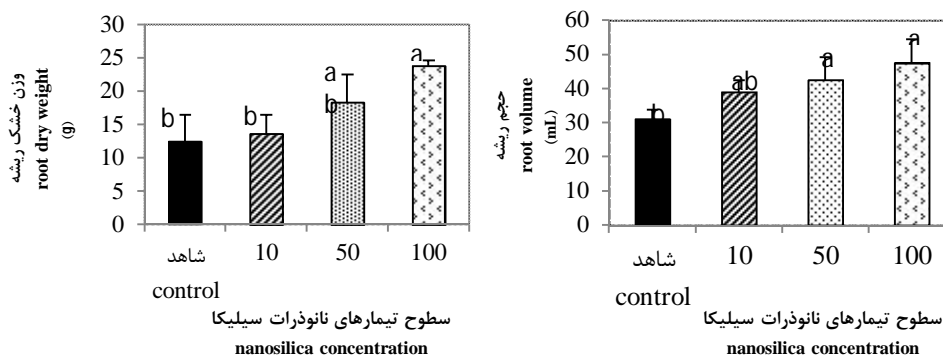
Figure 2. The effect of nanosilicon on diameter growth, height growth and root length of hawthorn (*C. aronia*) seedlings.



شکل ۲- مقایسه میانگین وزن خشک نهال زالزالک (*C. aronia*) تحت تأثیر نانوذرات سیلیکا با استفاده از آزمون Dunnett's T3 در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

Figure 2. Comparison of dry weight of hawthorn (*C. aronia*) in response to silica nanoparticles according to Dunnett's T3 test in 95% confidence interval.

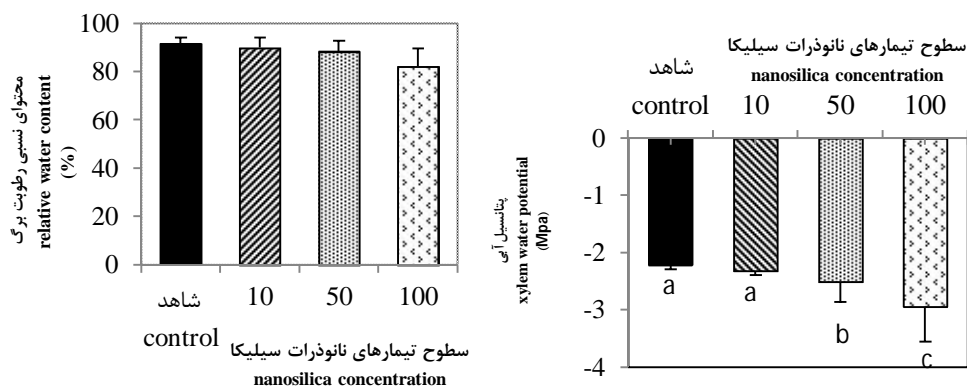
نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۲۳)، شماره (۱) ۱۳۹۵



شکل ۳- مقایسه میانگین حجم و وزن خشک ریشه گونه زالزالک (*C. aronia*) تحت تأثیر نانوذرات سیلیکا با استفاده از آزمون **Dunnett's T3** در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

Figure 3. Comparison of root dry weight and root volume of hawthorn (*C. aronia*) seedlings in response to silica nanoparticles according to Dunnett's T3 test in 95% confidence interval.

پارامترهای فیزیولوژی: اثر نانوذرات سیلیکا روی پتانسیل آبی آوند چوبی معنادار بود. مقایسه میانگین پتانسیل آبی آوند چوبی در سطوح شاهد و ۱۰ میلی‌گرم اختلاف معناداری را نشان نداد، در حالی که سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم از نظر آماری با هم و با بقیه سطوح اختلاف داشتند (شکل ۴). این در حالی است که محتوای نسبی آبی بین سطوح مختلف تیمار نانوذرات از نظر آماری اختلاف معنادار با هم نداشتند (جدول ۳). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که برخی نانوذرات می‌توانند پتانسیل گیاه را برای جذب آب و مواد غذایی افزایش داده و موجب توسعه کارایی سیستم ریشه و فعالیت نترات ردوکتاز شده و تجزیه مواد آلی را برای آمینواسیدهای ضروری تسریع بخشند (۱۱). در این راستا می‌توان بیان کرد که نانوذرات سیلیکون نیز می‌تواند رشد گیاه، به‌ویژه وزن خشک را بهبود بخشد که این امر ممکن است به دلیل افزایش جذب عناصر غیر آلی و فرآیند فتوسنتز باشد. در تحقیق پیش‌رو، میزان محتوای نسبی آب برگ در بین شاهد و سطوح مختلف نانو تغییر نکرده که ممکن است به دلیل زمان کوتاه مطالعه باشد. برعکس یافته‌های این تحقیق، حقیقی و پسرکلی (۲۰۱۳) دریافتند که محتوای نسبی آب برگ با افزایش غلظت نانوذرات سیلیکون طی ۱۴ روز آزمایش روی گونه *Solanum lycopersicum* L. افزایش می‌یابد (۸).



شکل ۴- شاخص‌های فیزیولوژی تحت تأثیر نانوذرات سیلیکا و مقایسه میانگین پتانسیل آبی آوند چوبی با استفاده از آزمون **Dunnett's T3** در سطح اطمینان ۹۵ درصد.

Figure 4. The effect of nanosilica on physiological indexes and results of mean comparison of xylem water potential according to Dunnett's T3 test in 95% confidence interval.

آزمون تکرار در زمان حاکی از آن است که پارامترهای فتوسنتز، هدایت روزنه آبی و تعرق تحت تأثیر تیمار اعمال شده (اثر اصلی) و زمان آزمایش (اثر درونی) قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، تقابل این دو اثر نیز تأثیر معنادار بر تبادلات گازی داشته است (جدول ۴).

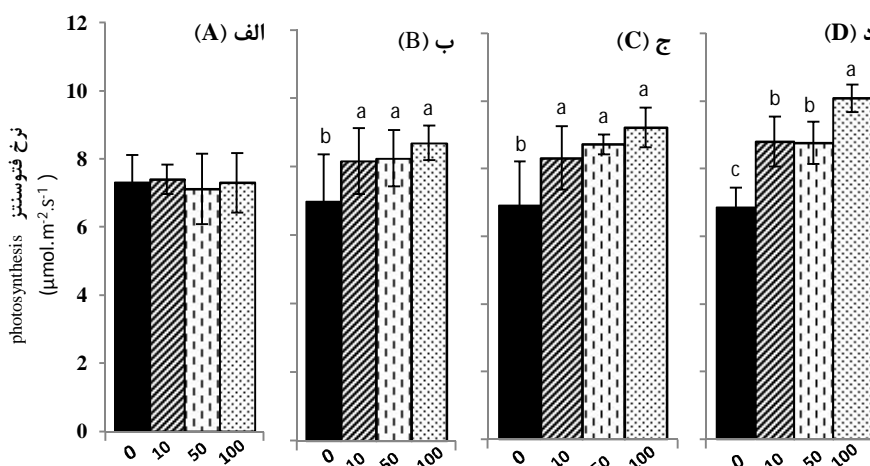
جدول ۴- تأثیر نانوذره سیلیکا و گذشت زمان بر تبادلات گازی نهال‌های زالزالک (*C. aronia*) در قالب آزمون تکرار در زمان.

Table 4. The effect of nanosilicon and time on gas exchange according to repeated measures ANOVA test in hawthorn (*C. aronia*) seedlings.

تعرق transpiration (mmol m ⁻² s ⁻¹)	هدایت روزنه stomatal conductance (μmol m ⁻² s ⁻¹)	فتوسنتز photosynthesis rate (μmol m ⁻² s ⁻¹)	اثرات اصلی Between effects
0.000*	0.000*	0.000*	اثرات درونی within effects
0.000*	0.002*	0.000*	زمان time
0.016*	0.039*	0.002*	زمان × نانوذرات Time × nanoparticle

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل جلد (۲۳)، شماره (۱) ۱۳۹۵

مقایسه روند تبادلات گازی در طول دوره آزمایش نشان داد که پس از ۲۰ روز، میزان فتوسنتز، هدایت روزنه و تعرق در سطوح ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نسبت به شاهد افزایش یافت و با ادامه روند تا پایان دوره، این اختلاف حفظ شد و در پایان آزمایش، نرخ فتوسنتز در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم دارای بالاترین مقدار بود (شکل ۵). با توجه به اینکه نانوذرات سیلیکون روی نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه و تعرق تأثیر مثبت داشته است، این فرآیند می‌تواند در تنظیم رشد گیاه مؤثر باشد. فتوسنتز، اساس ماده و انرژی برای تولید گیاه است و نرخ رشد و تولید گیاه به‌ویژه تجمع وزن خشک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۵).

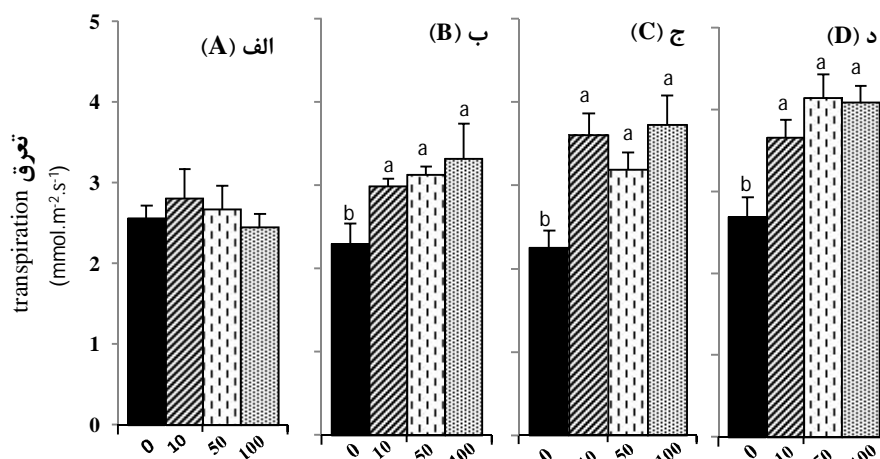


شکل ۵- تأثیر نانوذرات سیلیکا روی نرخ فتوسنتز و مقایسه میانگین بین هر دوره با استفاده از آزمون *Dunnett's T3* در سطح اطمینان ۹۵ درصد. (الف، ب، ج و د به ترتیب نشان دهنده اندازه‌گیری در دوره اول (روز دهم آزمایش)، دوم (روز بیستم آزمایش)، سوم (روز سیام آزمایش) و چهارم (روز چهلم آزمایش) می‌باشد).

Figure 5. The effect of nanosilica on photosynthesis rate and results of mean comparison between time intervals according to *Dunnett's T3* test in 95% confidence interval. (A, B, C and D are shown measured in first period (tenth day of testing), second period (twentieth day of testing), third period (thirtieth day of testing) and fourth period (fortieth day of testing) Respectively.

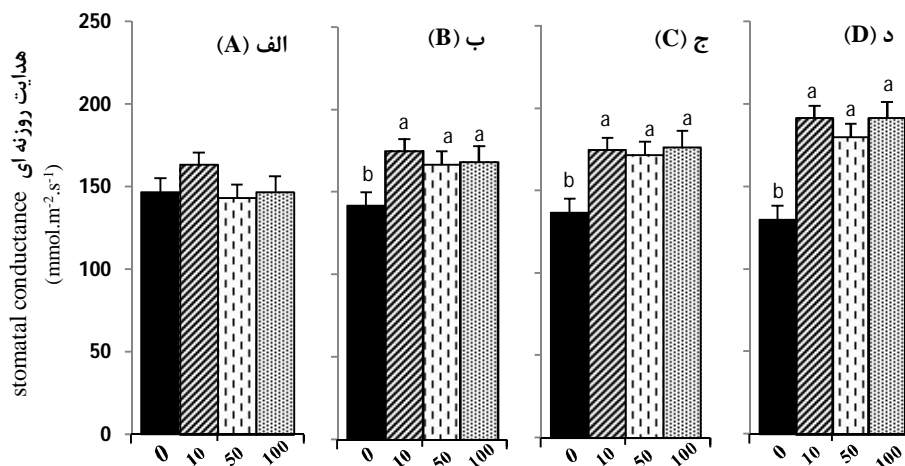
هدایت روزنه‌ای و تعرق نیز با افزایش دوره تحت تأثیر نانوذرات سیلیکا نسبت به سطح شاهد افزایش نشان دادند، میزان تعرق و هدایت روزنه‌ای در روز بیستم در سطوح ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم

با هم تفاوت نداشته اما از سطح کنترل به طور معناداری بیشتر بودند که این اختلاف تا پایان دوره آزمایش حفظ شد (شکل های ۶ و ۷).



شکل ۶- تأثیر نانوذرات سیلیکا روی نرخ تعرق و مقایسه میانگین بین هر دوره با استفاده از آزمون *Dunnett's T3* در سطح اطمینان ۹۵ درصد. (الف، ب، ج و د به ترتیب نشان دهنده اندازه گیری در دوره اول (روز دهم آزمایش)، دوم (روز بیستم آزمایش)، سوم (روز سیام آزمایش) و چهارم (روز چهلم آزمایش) می باشد).

Figure 6. The effect of nanosilica on transpiration and results of mean comparison between time intervals according to *Dunnett's T3* test in 95% confidence interval. (A, B, C and D are shown measured in first period (tenth day of testing), second period (twentieth day of testing), third period (thirtieth day of testing) and fourth period (fortieth day of testing) Respectively.



شکل ۷- تأثیر نانوذرات سیلیکا روی هدایت روزنه‌ای و مقایسه میانگین بین هر دوره با استفاده از آزمون **Dunnett's T3** در سطح اطمینان ۹۵ درصد. (الف، ب، ج و د به ترتیب نشان‌دهنده اندازه‌گیری در دوره اول (روز دهم آزمایش)، دوم (روز بیستم آزمایش)، سوم (روز سیام آزمایش) و چهارم (روز چهلم آزمایش) می‌باشد).

Figure 7. The effect of nanosilica on stomatal conductance and results of mean comparison between time intervals according to Dunnett's T3 test in 95% confidence interval. (A, B, C and D are shown measured in first period (tenth day of testing), second period (twentieth day of testing), third period (thirtieth day of testing) and fourth period (fortieth day of testing) Respectively.

افزایش نرخ فتوسنتز در این تحقیق ممکن است نتیجه تسهیل جذب مواد معدنی از جمله منیزیم و نیتروژن باشد که باعث توسعه تشکیل کلروفیل و فعال‌سازی آنزیم‌های کلیدی برای تثبیت کربن می‌شود. به طوری که در مطالعه باو- شان و همکاران (۲۰۰۴) مشاهده شد، نانوذرات SiO_2 سنتز کلروفیل برگ نهال‌های *Larix olgensis* را افزایش داده است (۳). حقیقی و پسرکلی (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خود روی *Solanum lycopersicum* L. به افزایش نرخ فتوسنتز تحت تأثیر نانو سیلیکون تحت تنش شوری اشاره کردند (۸). گاو و همکاران (۲۰۰۸) اظهار داشتند که بین نانوذرات TiO_2 و فتوسنتز گیاه اسفناج (*Spinacia oleracea*) رابطه نزدیکی وجود دارد که می‌تواند به دلیل بهبود جذب نور، انتقال و تبدیل انرژی نوری و یا افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو اکتیواز^۱ باشد. آن‌ها در مطالعه خود مشاهده کردند که فعالیت روبیسکو اکتیواز تحت نانوذرات TiO_2 افزایش یافت و منجر به افزایش کربوکسیلاسیون

1- Rubisco activase

پیمان اشکاوند و همکاران

روبیسکو، نرخ فتوستتوز و توسعه رشد گیاه شد (۸). در یافته‌های تحقیق حاضر نیز نانوذرات سیلیکون با بهبود فرآیند فتوستتوز تأثیر مثبت فزاینده‌ای بر بیوماس کل نهال‌ها داشته است.

نتیجه‌گیری کلی

از برآیند نتایج تحقیق پیش‌رو می‌توان دریافت که نانوذرات سیلیکا تأثیر مثبت و مفیدی روی برخی صفات از جمله وزن خشک اندام‌های مختلف نهال زالزالک، پتانسیل آبی آوند چوبی، کارایی نسبی آب و نرخ تبدلات گازی داشته است. به‌علاوه، نانوذره سطح ۱۰۰ میلی‌گرم در مقایسه با سطوح ۱۰ و ۵۰ میلی‌گرم روی برخی صفات تأثیر بهتری داشته است. اگرچه در این تحقیق، حضور و چسبندگی نانوذرات روی سطح اپیدرم ریشه مشاهده شد، مطمئناً با مطالعات کامل‌تر از طریق تجزیه عناصر ساقه و برگ گیاه، قضاوت روی انتقال و جذب این نانوذرات در گیاه و بهبود صفات رویشی و فیزیولوژی، می‌تواند با قوت بیشتری صورت گیرد. شایان ذکر است که تحقیق حاضر با اعمال نانوذرات جزء اولین تحقیقاتی است که در رابطه با گونه جنگلی و چندمنظوره زالزالک زرد در ایران انجام می‌شود و به‌طورکلی کشف مکانیسم گیاهان جنگلی در پاسخ به نانوذرات می‌تواند از اهمیت بسزایی برخوردار باشد. از این‌رو، مطالعات کامل‌تر با استفاده از نانوذرات سیلیکا و یا دیگر نانوذرات، در دوره‌های طولانی‌تر توسط پژوهشگران دیگر می‌تواند راهگشایی برای یافته‌های دقیق‌تر و محکم‌تر، از نظر عملکردی و توجیه اقتصادی فراهم آورد.

سپاسگزاری

بر حسب وظیفه از حمایت‌های تشویقی ستاد ویژه توسعه فناوری نانو تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Ahmadloo, F., Tabari, M., Azadi, P., and Hamidi, A. 2014. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) and stratification on germination traits of *Crataegus pseudoheterophylla* Pojark seeds. *Scientia Horticulturae*, 172(9): 61-67.
2. Ashkavand, P., Tabari, M., and Zarafshar, M. 2014. Assessment of Drought Resistance in Hawthorn and Mahaleb Seedlings with Emphasis on Biochemical Parameters. *Zagros Forests Researches*, 1(1): 1-18. (In Persian)

3. Bao-shan, L., shao-qi, D., Chun-hui, L., Li-jun, F., Shu-chun, Q., and Min, Y. 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedling. *Journal of Forestry Research*, 15(2): 138-140.
4. Bndani, M., and abdozadeh, A. 2007. Effects of silicon nutrition on salinity tolerance of *Puccinellia distans* (jacq.) parl. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(3): 111-119. (In Persian)
5. Chen, W., Yao, X., Cai, K., and Chen, J. 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.
6. Gao, F., Liu, C., Qu, C., Zheng, L., Yang, F., Su, M., and Hong, F. 2008. Was improvement of spinach growth by nano-TiO₂ treatment related to the changes of Rubisco activase? *Biometals*, 21(1): 211-217.
7. Gulías, J., Flexas, J., Abadía, A., and Madrano, H. 2002. Photosynthetic responses to water deficit in six Mediterranean sclerophyll species: possible factors explaining the declining distribution of *Rhamnus ludovici-salvatoris*, an endemic Balearic species. *Tree Physiology*, 22(10): 687-697.
8. Haghghi, M., and Pessarakli, M. 2013. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherrytomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. *Scientia Horticulturae*, 161(1): 111-117.
9. Haghghi, M., Afifipour, Z., and Mozafarian, M. 2012. The Effect of N-Si on Tomato Seed Germination under Salinity Levels. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 6(16): 87-90.
10. Hakim, Y., Latif Khan, A., Shinwari, Z.K., Kim, D.H., Waqas, M., Kamran, M., and Jung Lee, I. 2012. Silicon treatment to rice (*oryza sativa* l. cv 'gopumbyeo') plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. *Pakistan Journal of Botany*, 44(3): 891-897.
11. Harrison, C.C. 1996. Evidence for intramineral macromolecules containing protein from plant silicas, *Phytochemistry*, 41(1): 37-42.
12. Ju, L.Y. 2005. *Crataegus oxyacantha* (aubepine) in the use as herb medicine in France. *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*, 30: 634-40.
13. Iwasaki, K., Meier, P., Fecht, M., and Horst, W.J. 2002. Effects of silicon supply on apoplastic manganese concentrations in leaves and their relation to manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Plant Soil*, 238(2): 281-288.
14. Khot, L.R., Sankaran, S., Maja, J.M., Ehsani, R., and Schuster, E.W. 2012. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35(1): 64-70.
15. Ma, J.F., and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8): 392-397.
16. Ma, J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1): 11-18.

17. Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y., and Kolmakov, A. 2010. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the total environment*, 408(16): 3053-3061.
18. Martinez, J.P., Lutts, S., Schanck, A., Bajji, M., and Kinet, J.M. 2004. Is osmotic adjustment required for water stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L?. *Journal of Plant Physiology*, 161(9): 1041-1051.
19. Miller, A.L. 1998. Botanical influences on cardiovascular disease. *Altern Med Rev*, 3: 422-431.
20. Monica, R.C., and Cremonini, R. 2009. Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62(2): 161-165.
21. Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T., Yoshida, Y., and Kumar, D.S. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*, 179: 154-163.
22. Parveen, N.U.S.R.A.T., and Ashraf, M.U.H.A.M.M.A.D. 2010. Role of silicon in mitigating the adverse effects of salt stress on growth and photosynthetic attributes of two maize (*Zea mays* L.) cultivars grown hydroponically. *Pakistan Journal of Botany*, 42(3): 1675-1684.
23. Pei, Z.F., Ming, D.F., Liu, D., Wan, G.L., Geng, X.X., Gong, H.J., and Zhou, W.J. 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.
24. Richmond, K.E., and Sussman, M. 2003. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(3): 268-272.
25. Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. 50(4): 1031-1036.
26. Schaller, J., Brackhage, C., Paasch, S., Brunner, E., Bäucker, E., and Dudel, E.G. 2013. Silica uptake from nanoparticles and silica condensation state in different tissues of *Phragmites australisi*. *Science of the Total Environment*, 442(1): 6-9.
27. Seeger, E.M., Baun, A., Kästner, M., and Trapp, S. 2009. Insignificant acute toxicity of TiO₂ nanoparticles to willow trees. *Journal of Soils and Sediments*, 9(1): 46-53.
28. Siddiqui, M.H., and Al-Whaibi, M.H. 2014. Role of nano-SiO₂ in the germination of tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 21(1): 13-17.
29. Slomberg, D.L., and Schoenfisch, M.H. 2012. Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environmental Science Technology*, 46(18): 10247-10254.
30. Suriyaprabha, R., Karunakaran, G., Yuvakkumar, R., Rajendran, V., and Kannan, N. 2012. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize

- (*Zea mays*. L) seeds under hydroponic conditions. *Current Nanoscience*, 8(6): 902-908.
31. Wang, X., Wei, Z., Liu, D., and Zhao, G. 2011. Effects of NaCl and silicon on activities of antioxidative enzymes in roots, shoots and leaves of alfalfa. *African Journal of Biotechnology*, 10(4): 545-549.
32. Yang, Y., Liu, Q., Han, C., Qiao, Y.Z., Yao, X.Q., and Yin, H.J. 2007. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings. *photosynthetica*, 45(4): 613-619.
33. Yuvakkumar, R., Elango, V., Rajendran, V., Kannan, N.S., and Prabu, P. 2011. Influence of Nanosilica Powder on the Growth of Maize Crop (*Zea Mays* L.). *International Journal of Green Nanotechnology*, 3(3): 180-190.
34. Zarafshar, M., Akbarinia, M., Askari, H., Hosseini, S.M., Rahaie, M., and Struve, D. 2015. Toxicity assessment of SiO₂ nanoparticles to pear seedlings. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(1): 13-22.
35. Zheng, L., Hong, F., Lu, S., and Liu, C. 2005. Effects of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach, *Biological Trace Element Research*, 104(1): 83-92.

Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 23 (1), 2016

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

Effect of SiO₂NPs on Growth and Physiological Characteristics of Hawthorn (*Crataegus aronia* L.) Seedlings

P. Ashkavand¹, *M. Tabari², M. Zarafshar³ and E. Ghanbari⁴

¹M.Sc. Student, Dept., of Forestry, Tarbiat Modares University, ²Professor, Dept., of Forestry, Tarbiat Modares University, ³Ph.D. Graduate, Dept., of Forestry, Tarbiat Modares University, ⁴Ph.D. Student, Dept., of Forestry, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Received: 04/20/2014 ; Accepted: 07/11/2015

Abstract

Background and objectives: In order to utilize nanoparticles in plant science, basic physiological research is required. So far, most investigations on nanoparticles effects on plant performance have focused their attention on grasses and crops while information on woody plants is very scarce. In this study, effect of silica nanoparticles on growth and physiological behavior of hawthorn (*Crataegus aronia* L.) seedlings - one of the most important species of Zagros habitat - was examined.

Materials and methods: a greenhouse experiment was set up following a completely randomized design with 4 treatments and 5 replicates. The treatments included soil irrigation with tap water (without nanoparticles) and three different concentrations of silica nanoparticles (NPs) - 0, 10, 50 and 100 mg.l⁻¹ - every three days until reach field capacity for a total period of 45 days. Assessment of gas exchange parameters (net photosynthesis, stomatal conductance and transpiration rate) during the experiment period as well as some physiological changes (leaf relative water content and xylem water potential) and biomass allocation (roots, stems and leaves) were measured at the end of experiment. Scanning electron microscopy (SEM) was used to study the presence of nanoparticles on the root epidermis.

Results: Although nanosilica on hawthorn trees partially reduced plant water potential (more negative), leaf relative water content was not affected by the SiO₂ NPs treatments. Silica nanoparticles significantly increased the gas exchange rate during the experiment, which finally led to an increase of plant biomass - especially of roots. Total biomass of seedlings subjected to irrigation with 100 mg.l⁻¹ was 40% higher compared to control plants. The evaluation of SEM images confirmed massive presence of silica nanoparticles on root epidermal surface.

Conclusion: In general, it can be stated that silica nanoparticles improved the physiological activity of plants, which resulted in high biomass accumulation in hawthorn seedling. Further studies are required to understand the mechanisms behind these responses. Genomic studies (gene and protein expression) might be considered by plant biologists as starting point to achieve this goal.

Keywords: Biomass, Water potential, Gas exchange, Relative water content, Nanoparticles

*Corresponding author: mtabari@modares.ac.ir