مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال چهاردهم، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۴۰۱
ص ۲۴۳-۲۲۷
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2022.266051.1757
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.20086113.1401.14.3.1.1

تأثیر نانوذرات اکسید روی بر صفات رویشی، ریختی و فیزیولوژیکی نهال‌های بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) تحت تنش خشکی

هادی ایمانی[۱]، داود کرتولی‌نژاد[۲*]، علی‌اصغر ذوالفقاری[۳] و الهه نیکوئی[۴]

[۱]دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد علوم زیستی جنگل، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، ایران
[۲]استادیار گروه جنگلداری، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، ایران
[۳]دانشیار گروه بیابان‌زدایی، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان، ایران
[۴]دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۳۰)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر نانواکسید روی بر هجده صفت مختلف رویشی، ریختی و فیزیولوژیکی نهال‌های بلوط ایرانی تحت تنش خشکی بررسی شد. نهال‌های دوساله پس از انتقال به سمنان و دو ماه فرصت تثبیت در شرایط گلخانه، پیش از شروع آزمایش، اندازه‌گیری اولیه شدند. آنالیزهای آماری در قالب آزمایش فاکتوریل برپایهٔ طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور تنش خشکی (ظرفیت زراعی ۸۰، ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد) و نانواکسید روی (غلظت‌های ۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) در چهار تکرار انجام گرفت. پس از دو بار محلول‌پاشی با نانواکسید روی با فاصلهٔ زمانی یک‌ماهه و شش ماه رویش در شرایط گلخانه، همهٔ نهال‌ها اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی و غلظت نانواکسید روی از تعداد و رشد طولی برگ، رشد ارتفاعی و قطری و تعداد شاخه‌های نهال، کاسته می‌شود، اما تعداد برگ و درصد لکه‌های نانویی و نیز تعداد برگ‌های خشک افزایش می‌یابد. بهترین تیمار از نظر صفات رویشی و کیفی، مربوط به ترکیب آبیاری با ۴۰ درصد ظرفیت زراعی به‌همراه غلظت نانواکسید روی ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی در غلظت‌های مختلف نانواکسید روی، تنها آنزیم سوپراکسیداز دیسموتاز اختلاف معنی‌داری با شاهد داشت، اما در دیگر آنزیم‌های آزمایش‌شده (مانند کاتالاز، آسکوربات پروکسیداز و گایاکول پروکسیداز) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در کل با توجه به نداشتن تأثیر چندان بر صفات نهال و ایجاد اثر سوختگی بر سطح برگ‌ها در برخی تیمارها، استفاده از نانواکسید روی به‌منظور بهبود مقاومت به خشکی، استقرار و رویش نهال‌های بلوط توصیه نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: احیای جنگل، رویش نهال، صفات فیزیولوژیکی، ظرفیت زراعی، فعالیت آنزیمی.

مقدمه

پدیدهٔ خشکیدگی پوشش گیاهی و کمبود آب یکی از مهم‌ترین مشکلات مناطق خشک و نیمه‌خشک است که بر رشد و نمو گیاهان اثر می‌گذارد (Bahmani et al., 2015; Ercoli et al., 2007; Yousefi et al., 2017). تنش خشکی بر وزن خشک زیست‌توده شامل ریشه، اندام‌های هوایی و طول آن اثر می‌گذارد و سبب کاهش شدید فتوسنتز، مختل شدن فرایندهای فیزیولوژیکی، توقف رشد و سرانجام مرگ گیاه می‌شود (Bahmani et al., 2015; Bahmani et al., 2018; Yousefi et al., 2017). ایران از نظر موقعیت جغرافیایی در کمربند بیابانی

* نویسندهٔ مسئول شمارهٔ تماس: ۰۲۳۳۳۶۵۵۵۶۰ ایمیل: Kartooli58@semnan.ac.ir

جهـان واقـع شـده اسـت و منطقـه‌ای خشـک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید، جنگل‌های زاگـرس تـأثیر مهمی در حفاظت خاک، تأمین آب، تعدیل آب‌وهـوا و تعادل اقتصادی- اجتماعی دارند. امروزه متأسـفانه بـه دلایل مختلف ماننـد دخالـت مسـتمر انسـان، عوامـل اقلیمی، آفات و بیماری‌ها، خشکیدگی‌های مختلفی در جنگل‌های زاگرس به وقوع پیوسته کـه در بسـیاری از منـاطق بـه نـابودی درختـان منجـر شـده اسـت (Hamzehpour et al., 2011).

جنگل‌های بلوط، مهم‌ترین و گسترده‌ترین پوشش جنگلی زاگرس‌اند که در زمرهٔ جنگل‌هـای خشـک‌گـرا (Xerophyte) معرفـی شـده‌انـد. گونـهٔ بلـوط ایرانـی (*Quercus brantii* L.; Syn: *Quercus persica* L.) با دارا بودن بیش از ۲۰۰۰ گونه، متنـوع‌تـرین جـنس تیرهٔ راش (Fagaceae) است که از مهم‌ترین گونه‌های درختی جنگلی ایران در جنگل‌های زاگـرس بـه‌شـمار مـی‌آیـد (Jazireie & Ebrahimi Rastaghi, 2003; Shariat et al., 2019). این گونه وسیع‌ترین پـراکنش را در میان جنس گونه‌های بلوط دارد و از درهٔ سـیلوانا در آذربایجان غربـی تـا ارتفاعـات جنـوبی روسـتاهای دادنجان و چنار سـوختهٔ شهرسـتان فیروزآبـاد فـارس گسـترش دارد (Azim Nejad et al., 2021). گونـهٔ مزبور نسبت به دیگر گونه های بلوط از انعطاف پـذیری اکولوژیکی بیشتری برخوردار اسـت؛ بـه‌نحـوی کـه در خاک های مختلف و در شـرایط گونـاگون فیزیـوگرافی به‌راحتی مستقر می‌شود. افزون‌بر این، نیاز رطوبتی آن کم است و در خاک‌های خشک نیز سـازگار مـی‌شـود (Panahi et al., 2009)، بنابراین باید به حفاظت، احیا و گسترش این گونهٔ بومی حیاتی که ۶۰ درصد سـطح غالب این مناطق را تشکیل می‌دهـد، توجـه بیشـتری شود. نتـایج تحقیـق Sisakhtnejad et al. (2016) در دو گونهٔ بلوط ایرانـی (*Quercus brantii* L.) و وی‌ول (*Quercus libani* Oliv.) نشـان داد کـه در شـرایط تنش خشکی، گونهٔ بلوط ایرانی نسبت به گونـهٔ وی‌ول با جذب سدیم کمتر برگ و در نتیجه نسبت سدیم بـه پتاسیم کمتر و کاهش تعداد بـرگ توانسـت مقاومـت بهتری در برابر تنش خشکی نشان دهد.

نانوفناوری یکی از علوم نوین در رشتهٔ کشاورزی و یکی از رشته‌های رو به توسعه و جدیـد دنیاسـت. هـر مادهٔ با اندازهٔ کمتـر از ۱۰۰ نـانومتر، نـانوذره خوانـده می‌شـوند (Kartoolinejad et al., 2017; Rahimi et al., 2016; Yousefi et al., 2017). پـژوهش‌هـای گذشته دربارهٔ نانومواد نشان مـی‌دهـد کـه ایـن مـواد می توانند تأثیر مطلـوب یـا منفـی در گیاهـان داشـته باشند که با توجه به نوع گونه، مراحل مختلف رشـد و ماهیـت نـانو متفـاوت اسـت (Rahimi et al., 2016; Yousefi et al., 2017). عناصـر کـم‌مصـرف بـرای گیاهان زراعی، از عناصر غذایی ضروری‌انـد؛ بـه‌طـوری که رشـد و عملکـرد گیاهـان را در خـاک‌هـایی چـون خاک‌های آهکی که با کمبود ایـن عناصـر مواجـه‌انـد، کاهش می‌دهد. از پنج عنصر مهم شناخته‌شده توسـط سازمان غذا و داروی آمریکا می توان اکسید روی را نام برد که ترکیبی ایمن است. عنصـر روی یکـی از هفـت عنصر کم‌مصرف ضروری برای رشد گیاهان اسـت کـه اثر بسیار زیـادی در مقاومـت گیاهـان بـه تـنش‌هـای محیطـی و زیسـتی دارد (Hosseini et al., 2008; Kartoolinejad et al., 2008)، به‌نحوی که کمبود آن فعالیـت چنـد آنـزیم مهـم ماننـد فسـفاتاز، الکـل دی‌هیـدروژناز، دیمیـدین‌کینـاز، کربوکسـی‌پپتیـداز، DNAو RNA را کـاهش مـی‌دهـد (Prasad et al., 1984). تحقیقات مختلفـی در زمینـهٔ نانواکسـید روی انجام گرفته است که از آن جملـه مـی‌تـوان پـژوهش Esparham et al. (2017) در گیاه کرچک (*Ricinus communis* L.) را نام برد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از نانواکسید روی در غلظت‌های کم، سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی و رشد گیاه کرچک می‌شود، در صورتی کـه در غلظـت‌هـای زیـاد نانواکسـید روی (ZnO) به‌علت سمیت شدید، اثـر بازدارنـده بـر رشـد گیـاه دارد. پـژوهش دیگـری توسـط López-Moreno et al. (2010) در تعـدادی از گونـه‌هـای گیـاهی

ادویه‌ای نشان داد که استفاده از نانواکسید روی در غلظت زیاد، سبب کاهش رشد و کوتاه، باریک و قهوه‌ای شدن ریشه‌ها می‌شود که در نتیجهٔ آن، جذب مواد غذایی و رشد گیاه کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیت گونه‌های بلوط بومی موجود در جنگل‌های زاگرس، این تحقیق با هدف تعیین حد مقاومت گونهٔ بلوط ایرانی به سطوح مختلف تنش خشکی در غلظت‌های کم، متوسط و زیاد نانواکسید روی انجام گرفت. در واقع فرضیهٔ تحقیق این بوده است که برخی از غلظت‌های تیمار نانواکسید روی می‌توانند موجب افزایش مقاومت به خشکی این گیاه شوند. به این منظور، صفات رویشی، شادابی و فیزیولوژیکی برای ارزیابی اثرهای این آزمایش بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ پژوهش

به‌منظور اجرای این تحقیق، نهال‌های هم‌سن و کاملاً یکسان بلوط ایرانی از نظر شادابی و ارتفاع نهال به‌صورت گلدان‌های پلاستیکی کوچک از نهالستان مرکز تحقیقات شهرستان سنندج انتخاب و به شهرستان سمنان انتقال داده شدند. به‌منظور سازگاری نهال‌ها با شرایط آب‌وهوایی محل آزمایش، نهال‌ها به‌مدت دو ماه کاملاً مراقبت و آبیاری شدند. سپس قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارهای تنش خشکی و نانواکسید روی، پارامترهای رویشی مانند تعداد کل برگ، تعداد برگ‌های خشک، تعداد برگ‌های سالم، شادابی و نیز مشخصه‌های ریختی نهال شامل ارتفاع نهال، قطر یقهٔ نهال و تعداد شاخه‌های اصلی اندازه‌گیری شد. آبیاری در نوبت سه‌روزه و براساس ظرفیت زراعی (شاخص تعیین تنش خشکی) تعیین و برای هر سطح اجرا شد. مقدار آبیاری براساس درصد ظرفیت زراعی در چهار سطح شامل ظرفیت زراعی ۸۰ درصد به مقدار ۸۰۰ سی‌سی، ظرفیت زراعی ۶۰ درصد به مقدار ۵۰۰ سی‌سی، ظرفیت زراعی ۴۰ درصد به مقدار ۳۷۰ سی‌سی و ظرفیت زراعی ۲۰ درصد به مقدار ۱۸۰ سی‌سی محاسبه شد. محلول نانواکسید روی نیز در پنج سطح یعنی با غلظت‌های ۰، ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تهیه شد (Wang et al., 2012). پس از شش ماه رویش در شرایط گلخانه، هجده صفت مختلف رویشی، ریختی و فیزیولوژیکی در نهال‌ها و نیز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ بلوط ایرانی اندازه‌گیری و ارزیابی شد.

شیوهٔ اجرای پژوهش

روش تهیهٔ نانوذرات اکسید روی (ZnO)

نانواکسید روی استفاده‌شده در این تحقیق محصول شرکت آمریکایی US Research Nanomaterials Inc (Houston, USA) بود که مشخصات آن در جدول ۱ ذکر شده است. تصویر TEM و SEM به‌همراه نمودار XRD نانواکسید روی استفاده‌شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

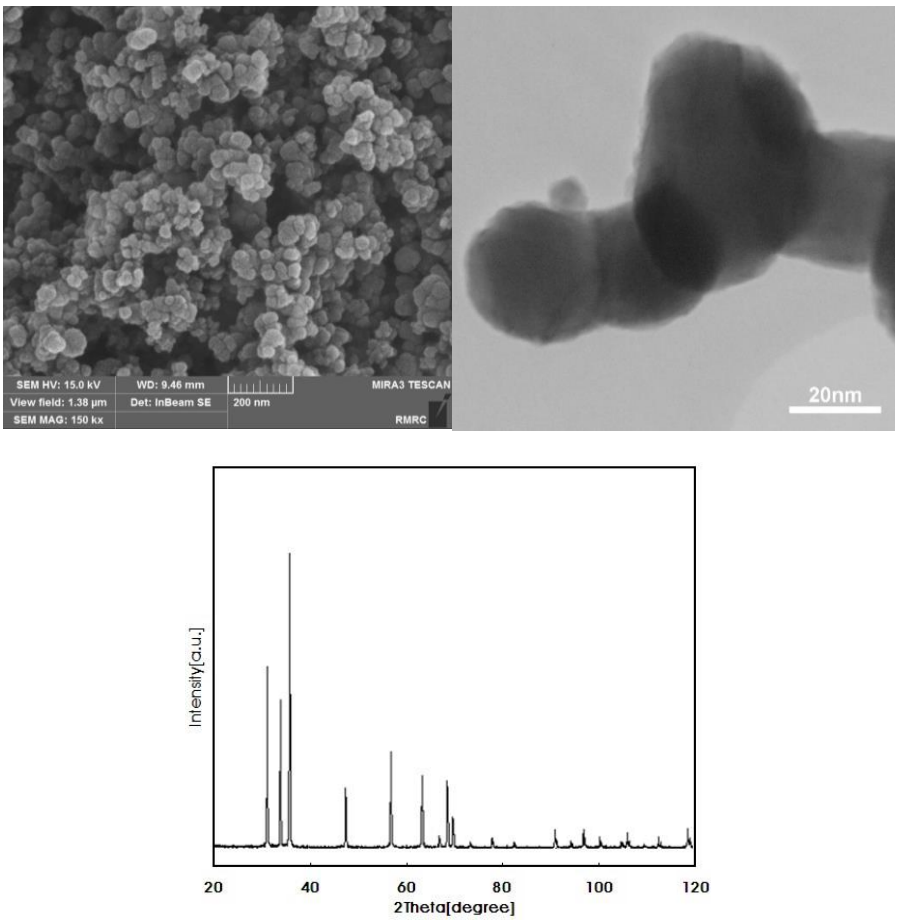
پودر نانواکسید روی در آب مقطر ریخته و با استفاده از همزن التراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز) به‌مدت ۱۵ دقیقه، مخلوط‌های یکنواخت نانوذرات اکسید روی با غلظت‌های ۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر ساخته شد. محلول‌پاشی نانومادهٔ تهیه‌شده روی برگ‌ها در دو نوبت و با فاصلهٔ زمانی یک ماه، صورت گرفت. برای ایجاد شرایط مساوی در نوبت‌های آبیاری، هر سطح گلدان به‌صورت کاملاً مشابه و با وزن ۴۳۵۰ گرم تهیه شد. آب استفاده‌شده نیز با توجه به معادلهٔ AW= FC–PWP به‌دست آمد که در این معادله AW آب قابل استفاده، FC رطوبت خاک در ظرفیت زراعی و PWP رطوبت خاک در نقطهٔ پژمردگی دائم است. همچنین رطوبت خاک در مکش ۳۰ kPa به‌عنوان FC، با استفاده از تانسیومتر در نمونهٔ خاک گلدان و نقطهٔ PWP با استفاده از داده‌های شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت در ظرفیت زراعی نیز، با استفاده از مدل شبکهٔ عصبی برنامهٔ RETC تعیین شد. آبیاری

گلدان‌ها هر سه روز یک بار، با توجه به وزن گلدان و مقدار تعیین‌شده پس از اولین مرحله به‌صورت اختلاف وزن گلدان (کاهش آب در اثر تبخیر)، در هر نوبت آبیاری انجام گرفت. در دو مرحله از هر تیمار، چهار نمونه برگ در شرایط کاملاً منجمد به‌منظور تعیین آنزیم‌های مورد نظر و پروتئین به آزمایشگاه ارسال شد.

جدول ۱- مشخصات نانواکسید روی استفاده‌شده در آزمایش

Table 1. Characteristics of Zinc Oxide nano particles used in this study

درصد خلوص نانوذرات	Purity	99.8%
میانگین اندازهٔ ذره	Particle Size	10-30 nm
مساحت سطح ویژه	Special Surface Area	20-60 m^2/g
رنگ	Color	milky white
فاز کریستال	Crystal phase	single
مورفولوژی کریستال	Crystal Morphology	nearly spherical
دانسیته	Density	5606 kg/m^3
سنجش سولفاته	Sulphated assay	$\leq 0.1\%$
وزن مولکولی	Molecular Weight	81.37
نقطهٔ ذوب	Melting Point	1,975° C (3,587° F)
نقطهٔ جوش	Boiling Point	2,360° C (4,280° F)
جرم تک ایزوتوپ	Monoisotopic Mass	79.924061 Da



شکل ۱- بالا: تصویر SEM و TEM؛ پایین: گراف XRD از نانواکسید روی استفاده‌شده (10-30 nm, Z-Average=20) nm

Figure 1. Up: SEM and TEM images; Down: XRD graph of Zinc Oxide nano particles used in the study (10-30 nm, Z-Average=20 nm)

به‌منظور اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ شامل سوپراکسیداز دیسموتاز، آسکوربات پروکسیداز، کاتالاز، گایاکول پروکسیداز و پروتئین، نمونه‌های برگ منجمد در هاون چینی به‌همراه نیتروژن مایع کوبیده و کاملاً خرد شدند. ۰/۵ گرم پودر برگ آسیاب‌شده به لوله-های آزمایش ۲ میلی‌لیتری انتقال یافت و ۱ میلی‌لیتر از بافر استخراج به آنها اضافه و به‌مدت ۳۰ ثانیه ورتکس شد. نمونه‌ها در دو نوبت به‌مدت ۱۵ و ۱۰ دقیقه و در ۱۴۰۰۰ دور بر دقیقه در دمای ۴ درجهٔ سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند و عصارهٔ رویی هر بار برداشته و دوباره سانتریفیوژ شد (Beauchamp & Fridovich, 1971).

روش تحلیل

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایهٔ کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام گرفت. پس از برداشت داده‌ها به‌منظور سنجش توزیع نرمال داده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف، برای بررسی همگنی واریانس از آزمون لون و برای بررسی معنی‌دار بودن اختلاف آماری در بین تیمارها از آنالیز واریانس دوطرفه (Two-way – ANOVA) استفاده شد. در نهایت به‌منظور مقایسهٔ میانگین داده‌ها از آزمون توکی (Tukey HSD) بهره‌گیری شد. همهٔ مراحل آماری در محیط نرم‌افزار SPSS و رسم نمودارها نیز در برنامهٔ اکسل انجام گرفت.

نتایج

اثر نانواکسید روی و تنش خشکی بر تعداد و شادابی برگ بلوط ایرانی

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی بر همهٔ ویژگی‌های رویشی برگ گونهٔ بلوط ایرانی به‌جز شاخص تعداد کل برگ، معنی‌دار بوده است. نتایج بررسی تأثیر نانواکسید روی نیز نشان داد که تأثیر تیمار نانو، تنها بر تعداد برگ‌های دارای لکهٔ نانو در اثر سوختگی معنی‌دار است و در فاکتورهای دیگر اختلاف معنی‌داری ندارد (جدول ۲).

جدول۲- نتایج تجزیهٔ واریانس ویژگی‌های رویشی برگ

Table 2. The results of ANOVA for growth characteristics of leaf

	ویژگی‌های رویشی Growth characteristics	df	Ms	F	Sig.
تنش خشکی براساس ظرفیت زراعی Drought stress based on field capacity	تعداد کل برگ Total leaf No.	3	404.28	1.99	0.13 ^{ns}
	تعداد برگ‌های سالم قدیمی Old healthy leaves No.	3	936.42	29.09	0.000**
	تعداد برگ‌های لکهٔ نانویی Leaves with nano blight No.	3	248.81	5.64	0.020*
	تعداد برگ‌های خشکیده Dried leaves No.	3	794.25	41.06	0.000**
	تعداد برگ‌های جدید New leaves No.	3	547.65	5.58	0.020*
	رتبه‌بندی شادابی Freshness ranking	3	2.03	15.25	0.000**
	درصد برگ‌های سالم Healthy leaves (%)	3	7586.79	12.63	0.000**
نانواکسید روی Zinc Oxide Nano Particles	تعداد کل برگ Total leaf No.	4	101.04	0.50	0.74 ^{ns}
	تعداد برگ‌های سالم قدیمی Old healthy leaves No.	4	122.61	3.82	0.08 ^{ns}
	تعداد برگ‌های لکه نانویی Leaves with nano blight No.	4	757.66	17.19	0.000**
	تعداد برگ‌های خشکیده Dried leaves No.	4	24.20	1.25	0.30 ^{ns}
	تعداد برگ‌های جدید New leaves No.	4	236.08	2.41	0.06 ^{ns}
	رتبه‌بندی شادابی Freshness ranking	4	0.22	1.64	0.18 ^{ns}
	درصد برگ‌های سالم Healthy leaves (%)	4	554.03	0.92	0.46 ^{ns}
نانو×تنش خشکی Nano× Drought stress	تعداد کل برگ Total leaf No.	12	169.77	0.83	0.62 ^{ns}
	تعداد برگ‌های سالم قدیمی Old healthy leaves No.	12	114.20	3.56	0.010*
	تعداد برگ‌های لکهٔ نانویی Leaves with nano blight No.	12	82.51	1.67	0.057 ^{ns}
	تعداد برگ‌های خشکیده Dried leaves No.	12	37.68	1.95	0.046*
	تعداد برگ‌های جدید New leaves No.	12	247.03	2.52	0.009**
	رتبه‌بندی شادابی Freshness ranking	12	0.25	1.89	0.054 ^{ns}
	درصد برگ‌های سالم Healthy leaves (%)	12	1941.52	3.23	0.001**

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد و *: معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ ns: بدون اختلاف معنی‌دار آماری

**: Significant level in 1%;* significant level in 5%; ns: not significant.

مقایسهٔ میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی پاسخ معنی‌دار به اثر متقابل تنش خشکی و نانواکسید روی بر ویژگی‌های رویشی برگ گونهٔ بلوط ایرانی را نشان داد، به‌نحوی که با افزایش غلظت نانو و تنش، در همهٔ شاخص‌ها به‌جز پارامترهای تعداد کل برگ، برگ‌های دارای لکهٔ نانو و رتبه‌بندی شادابی، اختلاف معنی‌داری مشاهده شد.

در روزهای ابتدایی پس از نانوپاشی، در غلظت‌های زیادِ نانواکسید روی، لکه‌های زیادی روی برگ‌ها نمایان شد. در بعضی از سطوح خشکی به‌ویژه سطح تنش ۲۰ درصد ظرفیت زراعی نیز کل برگ‌ها به‌صورت لکه‌ای و خشک درآمدند که در بسیاری از گلدان‌ها ریزش برگ‌های خشک را در پی داشت (شکل ۲).

شکل ۲- سمت راست: ایجاد لکه‌های سوختگی ناشی از محلول‌پاشی نانواکسید روی در روزهای ابتدایی؛ سمت چپ: توأم شدن اثر سوختگی ناشی از غلظت‌های زیاد نانواکسید روی و تنش‌های خشکی زیاد

Figure 2. Right: the creation of blight caused by foliar spraying of zinc oxide nano particles in the early days; Left: the combination of blight caused by high concentrations of zinc oxide nano particles and high drought stress

تعداد کل برگ

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسهٔ میانگین تعداد کل برگ در غلظت‌های مختلف نانواکسید روی و سطوح تنش خشکی، مشخص شد که تفاوت چندانی در تیمارها با تیمار شاهد وجود ندارد؛ به‌نحوی که در سطوح تنش ۸۰ و ۶۰ درصد (براساس ظرفیت زراعی)، غلظت نانو به‌ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و در سطوح تنش ۴۰ و ۲۰ درصد، ۱۰۰۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود که به‌ترتیب در آن سطوح خشکی دارای بیشترین تعداد برگ بوده است. به‌طور کلی شاید غلظت‌های نانو در تعداد کل برگ چندان تأثیرگذار نباشد، اما براساس نتایج سطوح تنش خشکی، با افزایش تنش خشکی از تعداد کل برگ کاسته خواهد شد (شکل ۳).

تعداد برگ‌های دارای لکه‌های سوختگی در اثر نانو و تعداد برگ سبز قدیمی

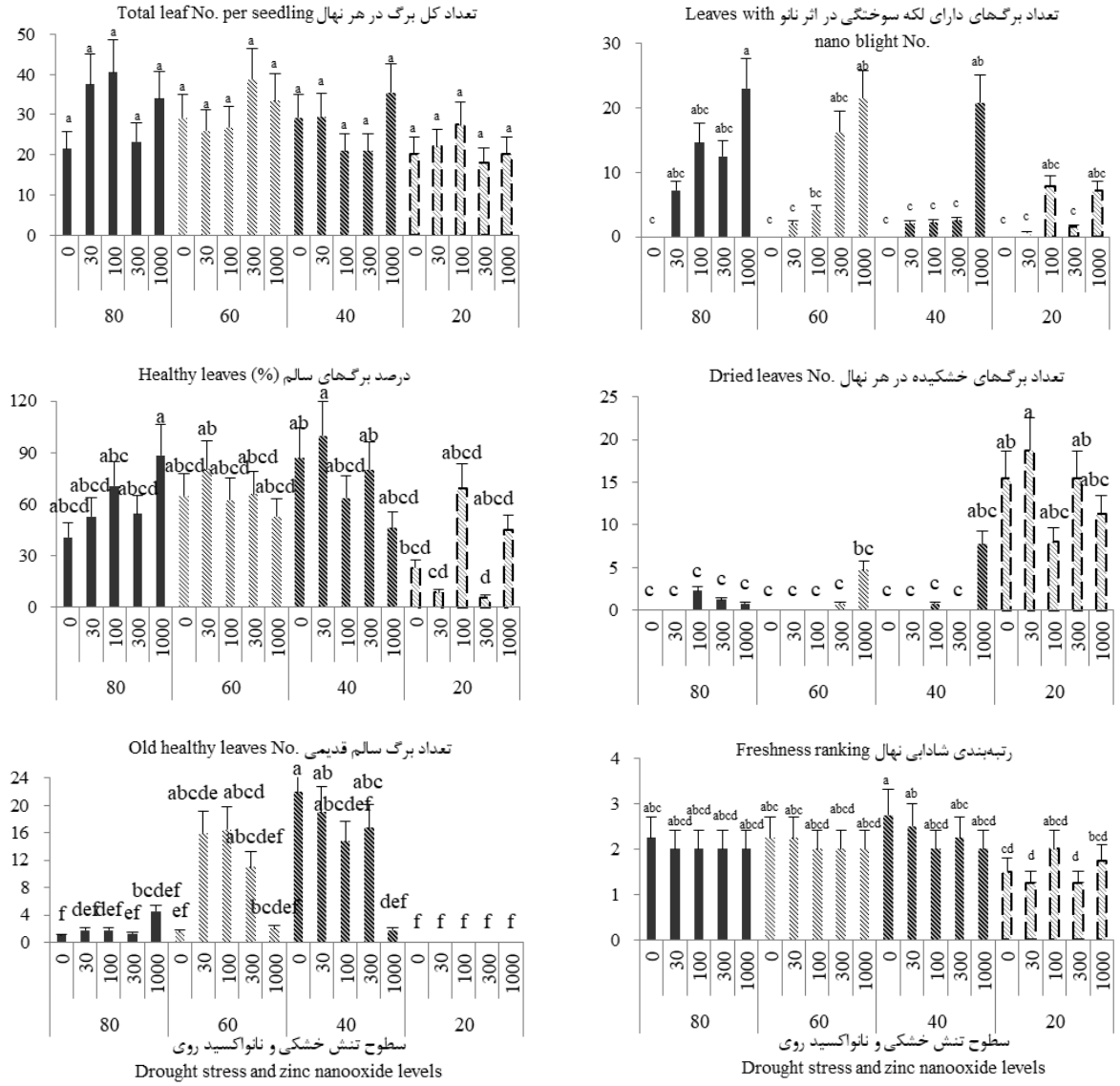
نتایج بررسی تعداد برگ‌های سبز قدیمی نشان داد که غلظت‌های ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی بیشترین تأثیر را بر سبز ماندن برگ‌ها دارد و با افزایش غلظت نانو نوعی سمیت در برگ پدید می‌آید که سبب خشک شدن برگ‌ها می‌شود. بیشترین لکه‌های سوختگی نیز در همهٔ سطوح تنش خشکی، در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی مشاهده شد که این موضوع دربارهٔ درصد برگ‌های دارای لکهٔ سوختگی تحت تأثیر نانو به کل برگ نیز صدق می‌کند. بیشترین تعداد برگ در تنش ۸۰ درصدی بود، از این‌رو لکه‌های سوختگی بر اثر نانو نیز در آن تنش بیشتر مشاهده شد (شکل ۳).

تعداد برگ‌های خشکیده در هر نهال

با توجه به نتایج مقایسهٔ میانگین، سطح تنش ۲۰ درصد با آبیاری ۱۸۰ سی‌سی در هر نوبت، در همهٔ غلظت‌های نانو و حتی شاهد سبب خشکیدگی برگ‌ها شد. همچنین در سطوح تنش ۴۰ و ۶۰ درصد با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی نیز تا حدودی برگ‌های خشکیده نسبت به شاهد (صفر) مشاهده شد که نشان داد افزون‌بر تنش که بیشترین تأثیر را در خشکیدگی برگ‌ها دارد، غلظت زیاد نانو نیز تأثیرگذار بوده است (شکل ۳).

رتبه‌بندی شادابی نهال‌ها

نتایج نشان داد که بیشترین شادابی نهال در تنش خشکی ۴۰ درصد بوده است، به‌نحوی که در دیگر سطوح تنش خشکی ۸۰، ۶۰، ۴۰ و۲۰ درصد به‌ترتیب روند کاهشی نسبت به شاهد داشت و با افزایش غلظت نانو، شادابی کاهش یافت. این موضوع دربارهٔ درصد برگ‌های سالم به کل برگ و همچنین تعداد برگ‌های جدید در هر نهال نیز صدق می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳- نتایج اثر تنش خشکی (بر اساس Fc) و نانواکسید روی بر ویژگی‌های رویشی برگ بلوط ایرانی

Figure 3. Results of drought stress (based on Fc) and zinc oxide nano particles effect on growth characteristics of Persian oak leaves

اثر نانواکسید روی و تنش خشکی بر ویژگی‌های کمی و کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که اثر تنش خشکی بر همهٔ ویژگی‌های کیفی برگ و نهال گونهٔ بلوط ایرانی به‌جز شاخص‌های تعداد برگ، طول برگ و پهنای برگ معنی‌دار است، اما دربارهٔ تیمار نانو در هیچ‌کدام از شاخص‌ها، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). براساس آزمون توکی نیز با افزایش مقدار نانو و تنش، به‌جز شاخص رشد قطری نهال، در دیگر شاخص‌های بررسی‌شده اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

جدول۳- نتایج تجزیهٔ واریانس ویژگی‌های کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی

Table 3. Results of ANOVA for qualitative characteristics of Persian oak leaves and seedlings

	ویژگی‌های کیفی Qualitative characteristics	df	ms	F	Sig.
تنش خشکی براساس ظرفیت زراعی Drought stress based on field capacity	رشد طولی نهال Longitudinal growth of seedlings	3	84.40	7.27	0.000 **
	رشد قطری نهال Diameter growth of seedlings	3	57.20	69.72	0.000 **
	تعداد شاخه No. of branch	3	7.15	2.99	0.038 *
	تعداد برگ No. of leaves	3	283.88	1.57	0.21 ns
	طول برگ Leaf length	3	0.60	0.51	0.68 ns
	پهنای برگ Leaf width	3	0.25	0.86	0.47 ns
نانواکسید روی Zinc Oxide Nano Particles	رشد طولی نهال Longitudinal growth of seedlings	4	6.76	0.58	0.68 ns
	رشد قطری نهال Diameter growth of seedlings	4	1.29	1.57	0.19 ns
	تعداد شاخه No. of branch	4	1.91	0.80	0.53 ns
	تعداد برگ No. of leaves	4	79.77	0.44	0.78 ns
	طول برگ Leaf length	4	0.17	0.14	0.97 ns
	پهنای برگ Leaf width	4	0.24	0.82	0.52 ns
نانو×تنش خشکی Nano× Drought stress	رشد طولی نهال Longitudinal growth of seedlings	12	10.04	0.87	0.59 ns
	رشد قطری نهال Diameter growth of seedlings	12	1.58	1.93	0.043 *
	تعداد شاخه No. of branch	12	1.85	0.77	0.68 ns
	تعداد برگ No. of leaves	12	133.06	0.74	0.71 ns
	طول برگ Leaf length	12	1.98	1.66	0.10 ns
	پهنای برگ Leaf width	12	0.62	2.15	0.26 ns

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد *: معنی‌دار در سطح ۵ درصد؛ ns: بدون اختلاف معنی‌دار آماری

**: Significant level in 1%; * significant level in 5%; ns: not significant.

رشد طولی و قطری نهال

بیشترین افزایش رشد طولی و قطری نهال مربوط به سطح تنش ۸۰ درصد با غلظت نانوی به‌ترتیب ۱۰۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر بود و پس از آن به‌ترتیب در سطوح تنش ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد، بیشترین رشد طولی و قطری نهال مشاهده شد (شکل ۴).

تعداد شاخه

بیشترین تعداد شاخه مربوط به سطح تنش ۸۰ درصد و تیمار با غلظت نانوی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. به‌طور کلی نظم یکنواختی در روند افزایشی و کاهشی وجود نداشت، اما به‌طور کلی در سطح تنش ۸۰ درصد بیشترین و سپس به‌ترتیب در سطوح تنش ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد بیشترین افزایش تعداد شاخه دیده شد (شکل ۴).

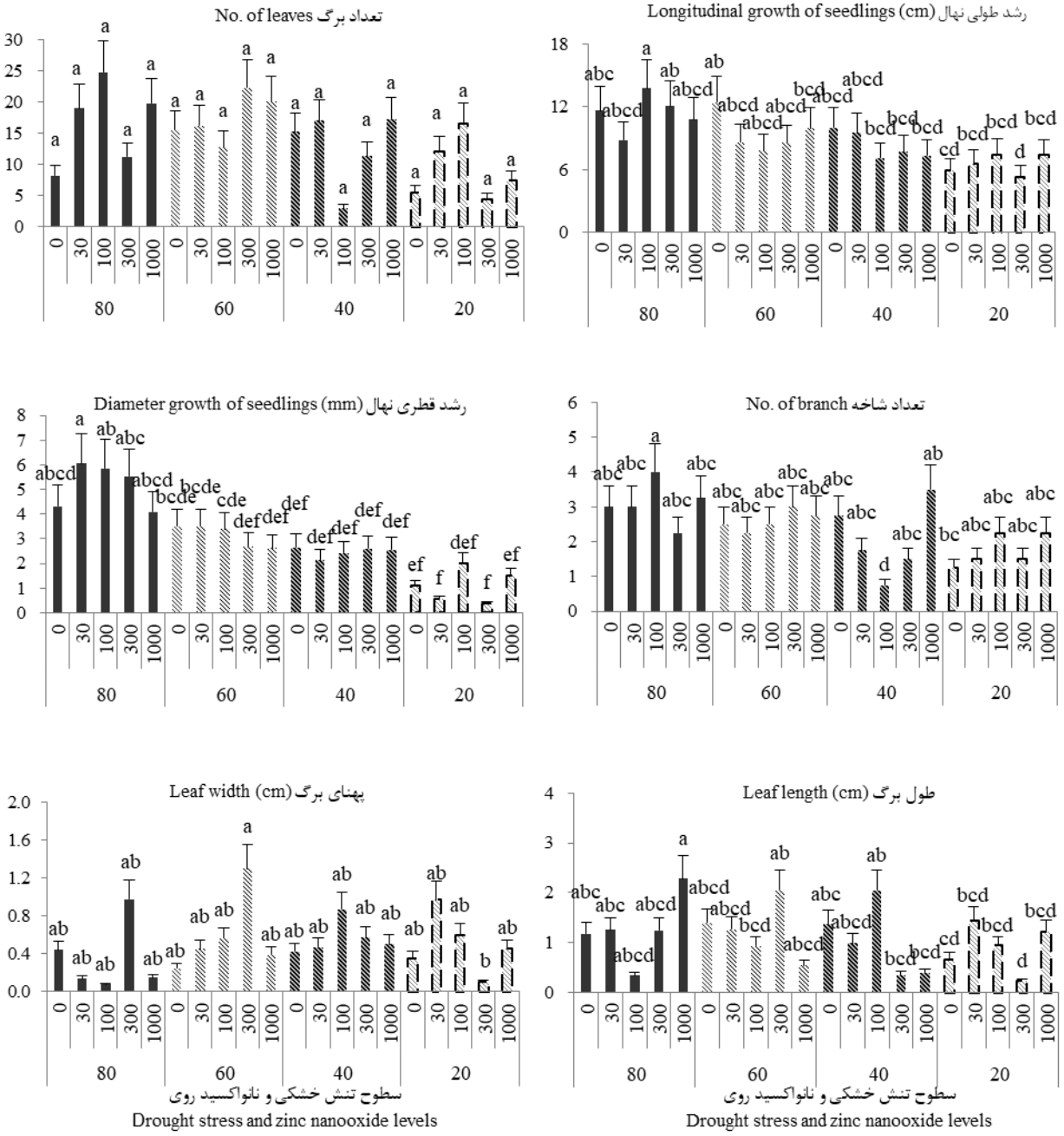
تعداد و طول برگ

بیشترین افزایش تعداد و طول برگ مربوط به سطح تنش ۸۰ درصد با غلظت نانو به‌ترتیب ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. پس از آن نیز به‌ترتیب

در سطوح تنش ۶۰، ۴۰ و ۲۰ درصد بیشترین افزایش تعداد برگ و طول برگ مشاهده شد (شکل ۴).

پهنای برگ

افزایش پهنای برگ نسبت به شاهد، در همهٔ سطوح ابتدا روند افزایشی و سپس روند کاهشی به‌ویژه در تیمارهای با غلظت نانو ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر داشت که البته بیشترین افزایش در سطح تنش ۶۰ درصد و تیمار با غلظت نانوی ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود (شکل ۴).



شکل ۴- نتایج اثر سطوح تنش خشکی و نانواکسید روی بر ویژگی‌های کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی

Figure 4. Results of drought stress (based on Fc) and zinc oxide nano particles effect on qualitative characteristics of Persian oak leaves

نتایج اندازه‌گیری آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ

براساس نتایج تجزیهٔ واریانس اثر تنش خشکی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پروتئین برگ گونهٔ بلوط ایرانی، تنها بر آنزیم سوپراکسیداز دیسموتاز (SOD) معنی‌دار بود و در دیگر فاکتورها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۵). در زمینهٔ تأثیر نانواکسید روی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پروتئین برگ نیز در هیچ‌کدام از فاکتورها اختلاف معنی‌داری دیده نشد. این موضوع دربارهٔ اثر متقابل تنش خشکی و نانواکسید روی نیز صدق می‌کند (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج تجزیهٔ واریانس آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ

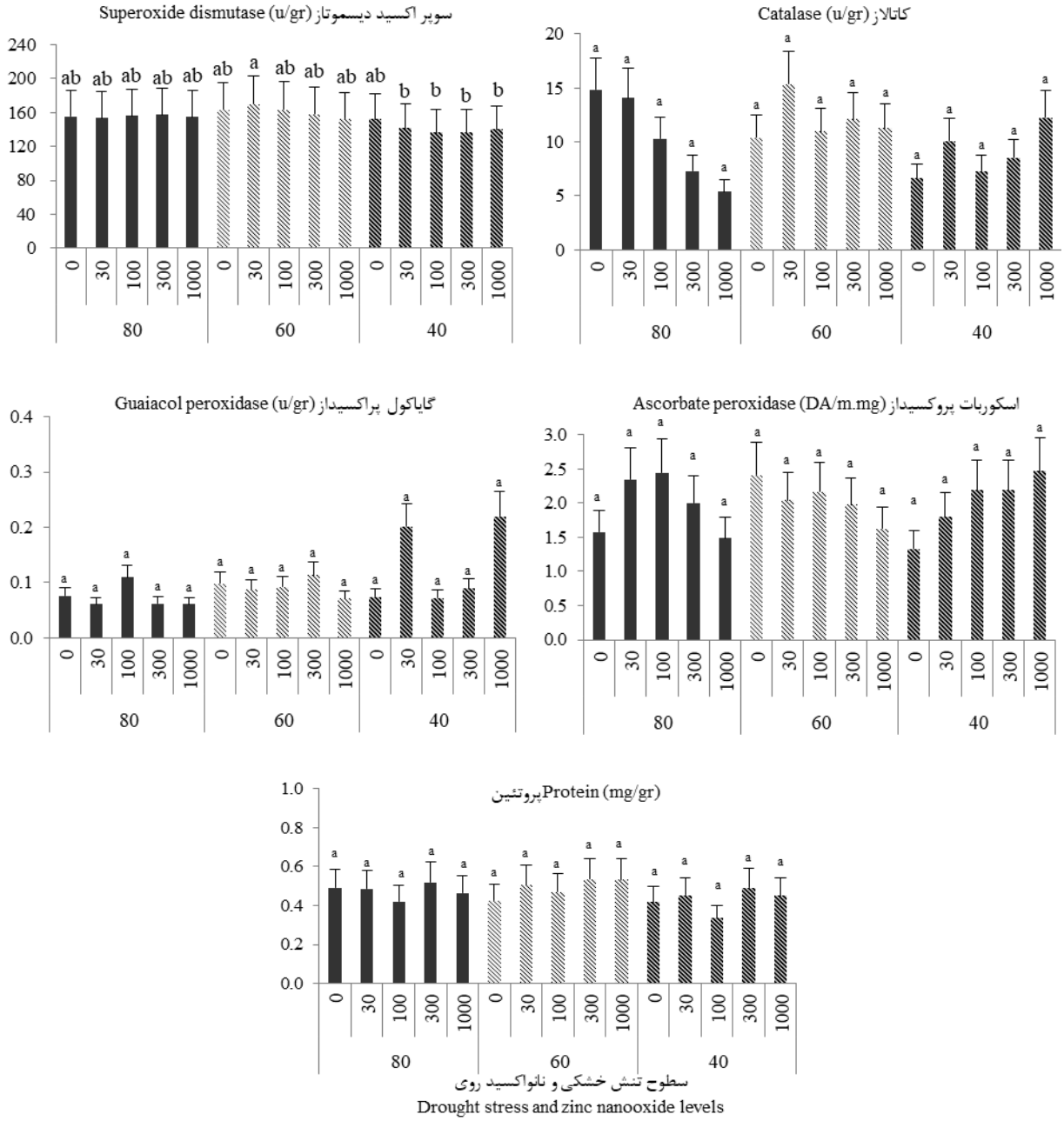
Table 4. Results of ANOVA for antioxidant enzymes of leaves

	آنزیم‌هاenzymes	df	ms	F	Sig.
تنش خشکی براساس ظرفیت زراعی Drought stress based on field capacity	سوپراکسیداز دیسموتاز Superoxide dismutase	2	2147.9	17.45	0.000**
	آسکوربات پروکسیداز Ascorbate peroxidase	2	0.03	0.08	0.92 ns
	کاتالاز Catalase	2	46.44	0.92	0.41 ns
	گایاکول پروکسیداز Guaiacol peroxidase	2	0.16	1.19	0.31 ns
	پروتئین Protein	2	0.22	1.20	0.31 ns
نانواکسید روی Zinc Oxide Nano Particles	سوپراکسیداز دیسموتاز Superoxide dismutase	4	115.06	0.94	0.45 ns
	آسکوربات پروکسیداز Ascorbate peroxidase	4	44.0	1.35	0.27 ns
	کاتالاز Catalase	4	30.72	0.61	0.66 ns
	گایاکول پروکسیداز Guaiacol peroxidase	4	0.10	0.71	0.59 ns
	پروتئین Protein	4	0.02	1.09	0.37 ns
نانو×تنش خشکی Nano× Drought stress	سوپراکسیداز دیسموتاز Superoxide dismutase	8	108.03	0.88	0.54 ns
	آسکوربات پروکسیداز Ascorbate peroxidase	8	0.71	2.14	0.05 ns
	کاتالاز Catalase	8	36.68	0.73	0.67 ns
	گایاکول پروکسیداز Guaiacol peroxidase	8	0.12	0.91	0.52 ns
	پروتئین Protein	8	0.004	0.21	0.99 ns

**: معنی‌دار در سطح ۱ درصد؛ ns: بدون اختلاف معنی‌دار آماری

**: Significant level in 1%; ns: not significant.

نتایج بررسی اثر تنش خشکی و نانواکسید روی بر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و پروتئین برگ گونهٔ بلوط ایرانی نشان داد که آنزیم کاتالاز و سوپراکسیداز دیسموتاز در FC ۶۰ درصد با غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر، آنزیم آسکوربات پراکسیداز در FC ۸۰ درصد با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، آنزیم گایاکول پراکسیداز در FC ۴۰ درصد با غلظت ۱۰۰۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و پروتئین در FC ۶۰ درصد با غلظت ۱۰۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین مقدار را داشتند (شکل ۵).



شکل ۵- نتایج بررسی اثر سطوح تنش خشکی و نانواکسید روی بر مقدار آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ نهال بلوط ایرانی
Figure 5. Results of drought stressand zinc oxide nano particles effect on amount of antioxidant enzymes of Persian oak leaves

بحث

نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش تنش خشکی و غلظت‌های مختلف نانواکسید روی، تعداد برگ‌های نهال بلوط ایرانی کاهش و در مقابل تعداد برگ‌های دارای لکهٔ نانو و برگ‌های خشکیده افزایش می‌یابد. دربارهٔ پارامترهای کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی مانند تعداد برگ، رشد طولی نهال، رشد طولی برگ، رشد قطری برگ و تعداد شاخه نیز مشخص شد که با افزایش تنش خشکی و غلظت نانواکسید روی، همهٔ ویژگی‌های مذکور روند کاهشی یافتند و تنها پارامتر افزایش پهنای برگ در سطح FC ۶۰ درصد با غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی روند بهتری داشت که دلیل آن وجود برگ‌های سبز قدیمی است که در تنش‌های متوسط مانند ۴۰ و ۶۰ درصد بیشتر

از دیگر تیمارها مشاهده شد. این موضوع در تحقیقات مشابه نیز مدنظر قرار گرفته است. برای مثال در تحقیق Sadeghzadeh Hallaj et al. (2019) در نهال بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) تحت تنش خشکی مشخص شد که تنش خشکی سبب کاهش شدید برگچه‌های نهال بنه می‌شود. کاهش برگ را می‌توان یکی از سازگاری‌های مورفولوژیک گیاهان در مواجهه با تنش خشکی دانست.

تحقیق Esparham et al. (2017) دربارهٔ جوانه‌زنی، مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی و محتوای قند برگ گیاه کرچک (*Ricinus communis* L.) تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نانواکسید روی نشان داد که غلظت‌های کم نانواکسید روی سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی، طول ساقه‌چه، ریشه‌چه، رنگیزه و قند محلول در برگ گیاه کرچک در مقایسه با شاهد می‌شود، اما غلظت‌های زیاد به‌علت تنش یا ایجاد سمیت شدید اثر بازدارنده بر رشد گیاه دارد که با نتایج تحقیق حاضر همسوست.

نتایج تحقیق Fazelikakhki & Goldani (2018) نیز نشان داد که استفاده از مقدار مناسب نانواکسید روی (۲۰۰ پی‌پی‌ام) در شرایط تنش شوری در گیاه سویا (*Glycine max* L.)، سبب بهبود صفات فیزیولوژیکی گیاه می‌شود و هدایت روزنه‌ای و شاخص پایداری غشا در سطوح مختلف را افزایش می‌دهد؛ اما افزایش غلظت نانو سبب کاهش صفات تحت بررسی می‌شود که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد.

نتایج تحقیق Ghasemisiyani et al. (2017) دربارهٔ مقایسهٔ سمیت نانواکسید روی و بالک بر رشد گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum - graecum* L.) در شرایط گلخانه‌ای نشان داد که افزایش غلظت نانو و بالک اکسید روی، اثر منفی بر وزن و تعداد گره‌های ریزوبیومی شنبلیله دارد و سبب کاهش غلظت فسفر در اندام‌های هوایی و ریشه می‌شود؛ به‌نحوی که با افزایش غلظت نانواکسید روی، طول ساقه کاهش می‌یابد که با نتایج این تحقیق مبنی بر مشاهدهٔ بیشترین افزایش رشد طولی و قطری نهال به‌ترتیب در غلظت‌های ۱۰۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی (غلظت‌های کم نانواکسید روی در این تحقیق) مطابقت دارد.

در تحقیق Salehi et al. (2019) در زمینهٔ تأثیر نانوذرات اکسید روی بر پارامترهای رشد و بیوشیمیایی گیاه لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) مشخص شد که با افزایش غلظت نانواکسید روی، رشد گیاه افزایش می یابد؛ درحالی که برای نانواکسید سریم به این صورت نبود و بیشترین غلظت، سبب مهار رشد بخش هوایی شد. البته در زمینهٔ محتوای کلروفیل، هر دو نوع نانوذره (نانوذرات اکسید روی و دی‌اکسید سریم) سبب کاهش محتوای کلروفیل کل گیاه شدند که بیانگر تأثیر منفی نانوذرات بر محتوای کلروفیل است. افزایش ارتفاع بخش هوایی گیاه و سطح برگ را هم می توان به‌دلیل تلاش گیاه برای استفاده هرچه بیشتر از نور برای فتوسنتز دانست. استفاده از نانوذرات اکسید روی سبب پدید آمدن نوار پروتئینی نیز شد که در نانواکسید سریم مشاهده نشد.

تحقیق Mezginezhad et al. (2019) دربارهٔ زنده‌مانی کالوس‌های زرشک بی‌دانه (*Berberis vulgaris* L.)تحت تأثیر ذرات نانواکسید آهن و اکسید روی نیز نشان داد که استفاده از ذرات نانواکسید روی سبب افزایش صفات وزن خشک، وزنِ تر، درصد رطوبت جرمی و درصد زیست‌مانی کالوس‌ها می‌شود. مهم‌ترین مشکل در رشد کالوس‌های زرشک بی‌دانه، قهوه‌ای شدن و مرگ آنها بوده است که نانوذرات اکسید روی سبب افزایش زیست‌مانی کالوس ها و بهتر شدن رشد آنها شد که دلیل آن را افزایش فعالیت‌های آنزیمی ذکر کرده‌اند.

سازش گیاهان با شرایط تنش خشکی بستگی به افزایش سیستم آنتی‌اکسیدانی آنها در برابر افزایش سطح گونه‌های اکسیژن فعال دارد. محتوای گونه‌های اکسیژن فعال در سیستم‌های بیولوژیک توسط دو نوع سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی شامل روش‌های آنزیمی

و غیرآنزیمی کنترل می‌شود. سیستم آنزیمی شامل آنزیم‌هایی مانند پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و سیستم غیرآنزیمی شامل آلفاتوکوفرول، بتاکاروتن آسکوربیک اسید، گلوتاتیون و ... است (Abedi & Pakniyat, 2010; Xu et al., 2008). نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی مانند خشکی، با افزایش محتوای آنتی‌اکسیدان‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد (Malik et al., 2010).

نتایج تحقیق Moaveni et al. (2011) در گیاه *Calendula officinalis* L. نشان داد که نانوذرات تیتانیوم در شرایط تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز می‌شود که با یافته‌های این تحقیق که نشان داد تنش خشکی تنها بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار است و بیشترین مقدار آن در سطح FC ۶۰ درصد با غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی بوده مطابقت دارد.

تحقیق Mahmoodi et al. (2020) در نهال بنه (*Pistacia atlantica*) نشان داد که استفاده از نانوذرات سیلیس تحت تنش خشکی سبب افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود. افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز از روش‌های مقابلهٔ گیاهان با تنش خشکی است.

پژوهش Mazarie et al. (2019) دربارهٔ تأثیر محلول‌پاشی دی‌اکسید تیتانیوم بر خصوصیات فیزیولوژیکی مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) تحت تنش خشکی نشان داد که بیشترین فعالیت آنتی‌اکسیدانی آنزیم‌ها مربوط به آنزیم سوپراکسید دیسموتاز است که با نتایج تحقیق حاضر که نشان داد تنش خشکی تنها بر آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار است مطابقت دارد.

نتایج تحقیقات Zabet et al. (2003) نیز نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز افزایش می‌یابد.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در افزایش تحمل به تنش خشکی تأثیر مهمی دارند و شدت فعالیت آنها در گیاه با توجه به شدت تنش و نوع گونهٔ گیاهی متفاوت است.

Niakan & Zangane (2014) در پژوهشی در زمینهٔ اثر تنش خشکی بر مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum - graecum*) دریافتند که تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ و ریشه به‌جز آنزیم آسکوربات‌پروکسیداز می‌شود. در صورتی که نتایج تحقیق در گونهٔ بلوط ایرانی نشان داد که تنش خشکی و غلظت‌های مختلف نانواکسید روی تنها بر آنزیم سوپراکسیداز دیسموتاز اثرگذار است و در دیگر آنزیم‌ها تأثیری ندارد.

تحقیق Ghadiri et al. (2014) دربارهٔ اثر نانوذرات نقره بر جوانه‌زنی بذر درخت کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* L.) در خاک و آب نشان داد که نانوذرات نقره حتی در غلظت‌های کم سبب ایجاد آثار منفی بر کیفیت جوانه‌زنی بذرهای کاج جنگلی در محیط خاکی و آبی می‌شود.

Bayramzadeh et al. (2018) در پژوهشی دربارهٔ جوانه‌زنی و رویش بذر کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* L.) تحت تأثیر نانوذرات نقره در خاک دریافتند که افزایش غلظت نانوذرات نقره می‌تواند سبب کاهش ویژگی‌های رویشی در همهٔ دوره‌های زمانی شود که با نتایج این تحقیق همسویی دارد.

نتایج تحقیق Ashkavand et al. (2016) دربارهٔ نهال زالزالک زرد (*Crataegus aronia* L.) نیز نشان داد که استفاده از نانوذرات سیلیکا سبب بهبود فعالیت‌های فیزیولوژیک و افزایش زی‌تودهٔ کل نهال‌های زالزالک زرد می‌شود.

Sayedena et al. (2019) پژوهشی دربارهٔ جوانه‌زنی و رشد اولیهٔ بارانک لرستانی (*Sorbus luristanica* L.) تحت تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم انجام دادند و دریافتند که نانوذرات دی‌اکسید

تیتانیوم سبب بهبود همهٔ صفات مانند درصد، سرعت و میانگین زمان جوانه‌زنی می‌شود؛ به‌نحوی که تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو سبب افزایش چشمگیر صفات جوانه‌زنی شد. در زمینهٔ بهبود رشد (طول ساقه‌چه) و تولید زیست‌توده نیز مشخص شد که تیمار ۷۵ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، بیشترین موفقیت و در مقابل تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر نانو کمترین موفقیت را داشته است که با یافته‌های تحقیق حاضر مبنی بر کاهش صفات کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی تحت تأثیر افزایش غلظت نانواکسید روی مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر بهترین تیمار از نظر تأثیر بر صفات رویشی و کیفی گونهٔ بلوط ایرانی، مربوط به سطح آبیاری با ظرفیت زراعی ۴۰ درصد و غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر نانواکسید روی بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت‌های مختلف نانواکسید روی و تنش خشکی، پارامترهای کیفی برگ و نهال بلوط ایرانی مانند تعداد برگ، رشد طولی نهال، رشد طولی برگ، رشد قطری برگ و تعداد شاخه کاهش و در مقابل تعداد برگ‌های خشکیده و تعداد برگ‌های دارای لکهٔ نانو افزایش می‌یابد. در کل، استفاده از فناوری‌های نوین مانند نانوذرات شاید در انعطاف‌پذیری و مقاومت گیاهان چوبی به تنش‌های محیطی مانند خشکی کمک کند، اما هر نوع فناوری جدیدی در کنار اثر مثبت خود، اثرهای منفی نیز دارد. نانوذرات نیز از این قاعده مستثنا نیستند و برخی اثرهای منفی نیز دارند که دانشمندان در حال بررسی آنها بر محیط زیست و محیط زندگی انسان‌ها هستند.

در نهایت با توجه به موارد گفته‌شده و همهٔ صفات بررسی‌شده، چون نانواکسید روی تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت به تنش خشکی نهال‌های بلوط ایرانی نداشته است، استفاده از این ماده با وجود تأثیر مثبت و مهم آن در علوم مختلف، به‌دلیل آلودگی و هزینه‌ای که به‌ویژه در کاربرد وسیع دارد پیشنهاد نمی‌شود و تحقیقات بیشتر در این زمینه ضرورت دارد.

References

Abedi, T., & Pakniyat, H. (2010). Antioxidant enzyme changes in response to drought stress in ten cultivars of Oilseed Rape (*Brassica napus* L.). *Czech Journal Genet Plant Breed 46*(1), 27-34.

Ashkavand, P., Tabari, M., Zarafshar, M., & Ghanbari, E. (2016). Effect of SiO_2NPs on Growth and Physiological Characteristics of Hawthorn (*Crataegus aronia* L.) Seedlings. *Journal of Wood & Forest Science and Technology*, *23*(1), 41-62. doi:10.22069/JWFST.2016.2875

Azim Nejad, Z., Badehian, Z., & Rezaei Nejad, A. (2021). The relationship between Iranian oak decline (*Quercus brantii* Lindl.) and some properties of soil and determining the ecophysiological responses of this. *Iranian Journal of Forest, 13*(3), 221-236. doi:10.22034/IJF.2021.141074

Bahmani, M., Naghdi, R., & Kartoolinejad, D. (2018). Milkweed seedlings tolerance against water stress: Comparison of inoculations with *Glomus intraradices* and *Pseudomonus putida*. *Environmental Technology & Innovation, 10*, 111-121. https://doi.org/10.1016/J.ETI.2018.01.001

Bahmani, M., Tabari, M., Jalali, S.G., & Kartoolinejad, D. (2015). Morphological and physiological changes in Calotropis procera seedlings under water stress conditions. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, *4*(7), 43-52. http://deej.kashanu.ac.ir/article-1-234-fa.html

Bayramzadeh, V., Mortazavi, E., Davoodi, M.H., Kheiri, Sh., & Hossein Ashrafi, S.Kh. (2018). The durability of negative effects of silver nanoparticles on seed germination and growth characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in soil. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, *26*(1), 1-11. doi:10.22092/IJFPR.2018.116504

Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, *44*, 276-287. https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8

Ercoli, L., Lulli, L., Mariotti, M., Masoni, A., & Arduini, I. (2007). Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy, 28*, 138-147. https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.002

Esparham, E., Saeidisar, S., Mahmoodzadeh, H., & Hadi, M.R. (2017). The Effects of Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles on the Germination, Biochemical and Ultrastructural Cell Characteristics of *Ricinus communis. Journal of Cell & Tissue, 8*(2), 151-165. https://doi.org/10.52547/jct.8.2.151

Fazelikakhki, S.F., & Goldani, M. (2018). Effects of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO) on Improving Morpho-physiological, Yield and Its Components of Soybean (*Glycine max* L.) var. Williams under Salinity Stress. *Journal of Crop Ecophysiology, 12*(2), 253-268.

Ghadiri, M., Bayramzadeh, V., & Davoudi, M.H. (2014). The Effect of Argent Nanoparticles on seed Germination of *Pinus sylvestris* in soil and Aqueous Suspension. *Journal of Forest and Wood Product* (*Iranian Journal of Natural Recources*), *66*(4), 367-376. doi:10.22059/JFWP.2014.36654

Ghasemisiyani, N., Fallah, S., & Rostamnejadi, A . (2017). Comparison between toxicity effects of ZnO nanoparticles and their bulk on fenugreek (Trigonella foenum - graceum) growth under greenhouse environment. *Journal of Plant Production Research (JOPPR), 24*(2), 23-42. doi: 10.22069/JOPP.2017.10706.2018

Hamzehpour, M., Kia-Daliri, H., & Bordbar, S.K. (2011). Preliminary study of manna oak (*Quercus brantii* Lindl.) tree decline in Dashte-Barm of Kazeroon, Fars province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 19*(2), 352-363. doi:10.22092/IJFPR.2011.107578

Hosseini, S.M., Kartoolinejad, D., Mirnia, S.K., Tabibzadeh, Z., Akbarinia, M., & Shayanmehr, F. (2008). The European mistletoe effects on leaves and nutritional elements of two host species in Hyrcanian forests. *Silva Lusitana, 16*(2), 229-237.

Jazireie, M.H., & Ebrahimi Rastaghi, M. (2003). Zagros. Zagros silviculture. Published Tehran University, Tehran.

Kartoolinejad, D., Hosseini, S.M., Mirnia, S.Kh., & Shayanmehr, F. (2008). The effect of mistletoe (*Viscum album* L.) on four nutrient elements Mg, Zn, Mn, Na and leaf area and weight of host trees in Hyrcanian forests. *Pajouhesh and Sazandegi, 77*, 47-52.

Kartoolinejad, D., Rahimi, D., Nourmohammadi, K., & Naghdi, R. (2017). The Effect of Carbon Nanotubes on drought resistance of Caucasian Alder (*Alnus subcordata* C.A. Mey) in Germination Stage. *Iranian Journal of Seed Science and Technology, 6*(2), 17-28.

López-Moreno, M.L., Dela Rosa, G., Hernandez-Viezcas, J.A., Peralta-Videa, J.R., & Gardea-Torresdey, J.L. (2010). X-ray absorption spectroscopy (XAS) corroboration of the uptake and storage of CeO_2 nanoparticles and assessment of their differential toxicity in four edible plant species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58*(6), 3689-3693. https://doi.org/10.1021/jf904472e

Mahmoodi, K., Alizadeh, Y., Abdul-Hamid, H., & Naji, H.R. (2020). Effect of nano Sio2 on physiological features of *Pistacia atlantica* subsp. *mutica* under drought stress. *Journal of Wood & Forest Science and Technology, 26*(4), 85-100.doi:10.22069/JWFST.2020.13986.1715

Malik, A.A., Li, W.G., Lou, L.N., Weng, J.H. & Chen, J.F. (2010). Biochemical/ physiological characterization and evaluation of in vitro salt tolerance in cucumber. *African Journal of Biotechnology, 9*(22), 3284-3292.

Mazarie, A., Mousavi nik, S.M., Ghanbari, A., & Fahmideh, L. (2019). Effect of titanium dioxide spraying on physiological characteristics of sage (*Salvia officinalis* L.) under water stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences, 12*(2), 539-553.doi:10.22077/ESCS.2019.1369.1304

Mezginezhad, Z., Ghaderi, M.GH., Alizde, Z., & Izanloo, A. (2019). Effect of Iron Oxide and Zinc Oxide Nanoparticles of on Callus Viability of Seedless Barberry. *Journal of Crop Breeding, 11*(30), 198-205.

Moaveni, P., Valadabadi, S.A., Aliabadi Farahani, H., & Maroufi, K., (2011). Nanoparticles TiO_2 spraying affected on calendula (*Calendula Officinalis* L.) under field condition. *Advances in Environmental Biology, 5*, 2242-2244.

Niakan, M., & Zanganeh, A. (2014). Effect of drought stress and salicylate on Antioxidant Enzymes activity in Fenugreek. *Journal of Plant Environmental Physiology, 9*(133), 38-45.

Panahi, P., Jamzad, Z., & Pourhashemi, M. (2009). Acorn production of Zagros forests oaks and their qualitative characteristics in Zagros section of National Botanical Garden of Iran. *Journal of Forest and Wood Products, 62*(1), 45-57.

Prasad, T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K.R., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R., & Pradeep, T. (1984). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition, 35*(6), 905-927. https://doi.org/10.1080/01904167.2012.663443

Rahimi, D., Kartoolinejad, D., Nourmohammadi, K., & Naghdi, R. (2016). Increasing drought resistance of *Alnus subcordata* C.A. Mey. seeds using a nano priming technique with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Forest Science, 62*(6), 269-278. https://doi.org/10.17221/15/2016-JFS

Sadeghzadeh Hallaj, M.H., Azadfar, D., & Mirzaei Nodoushan, H. (2019). Effect of shade on the leaflet morphology of wild Pistachio sapling under drought stress. *Iranian Journal of Forest, 11*(1), 95-104.

Salehi, H., Chehregani Rad, A.K., Majd, A., & Gholami, M. (2019). Effect of ZnO and CeO_2 nanoparticles on the element accumulation, growth and biochemical parameters in *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Plant Research (Biology of Iran), 32*(2), 259-271.doi:20.1001.1.23832592.1398.32.2.17.2

Sayedena, S.V., Pilehvar, B., Abrari-vajari, K., Zarafshar, M., & Eisvand, H.R. (2019). Effects of TiO_2 Nanoparticles on Germination and Primary Growth of Mountain Ash (*Sorbus luristanica*). *Iranian Journal of Seed Research*, *6*(1), 173-184.doi: 10.29252/yujs.6.1.173

Shariat, A., Mirzaie Nodoushan, H., Mirza, M., Zare, Z., Keneshloo, H., & Taghavi, F. (2019). An ionome study in Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) to evaluate factors affected oak decline. *Iranian Journal of Forest, 11*(3), 415-425.

Sisakhtnejad, M., Zolfaghari, R., Fayyaz, P., (2016). Assesment of drought resistant of *Quercus branti* and *Q. Libanii* seedlings using growth, physiological and nutrient uptake. *Applied Biology (Biannual Scientific Research)*, *30*(2), 137-157.doi:10.22051/JAB.2017.3258

Wang, C., Liu, L., Zhang, A., Xie, P., Jun Lu, J., & Ting Zou, X. (2012). Antibacterial effects of zinc oxide nano particleson escherichia coli K88. *African Journal of Biotechnology, 11*(44), 10248-54.doi: 10.5897/AJB11.3703

Xu, P.L., Guo, Y.K., Bai, J.G., Shang, L., & Wang, X.J. (2008). Effects of long-term chilling on ultrastructure and antioxidant activity in leaves of two cucumber cultivars under low light. *Physiologia Plantarum, 132*, 467-478.doi:10.1111/j.1399-3054.2007.01036.x

Yousefi, S., Kartoolinejad, D., & Naghdi, R. (2017). Effects of priming with multi-walled carbon nanotubes on seed physiological characteristics of Hopbush (*Dodonaea viscosa* L.) under drought stress. *International Journal of Environmental Studies, 74*(4), 528-539. https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1325627

Zabet, M., Hoseinzade, A.H., Ahmadi, A., & Khialparast, F. (2003). Effect of water stress on different traits and determination of the best water stress index in mung bean (*Vigna radiata*). *Iranian Journal of Agricultural Science, 34*(4), 889-898.

Iranian Journal of Forest
Vol. 14, No. 3, Autumn 2022
pp. 227-243

Research Article

The effect of zinc oxide nano particles on growth, morphological and physiological characteristics of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.*)* seedlings under drought stress

H. Imani[1], D. Kartoolinejad[2]*, A.A. Zolfaghari[3], and E. Nikouee[4]

[1]M.Sc. Graduate Student of Forest Biology, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
[2]Assistant Prof., of Forestry, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
[3]Associate Prof., of Soil Physics, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran.
[4]Ph.D. Student of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran

(Received: 9 January 2021; Accepted: 21 December 2021)

Abstract

In this study, the effect of zinc oxide nano particle (ZnO) on 18 different growth, morphological and physiological characteristics of Persian oak (*Quercus brantii* L.) seedlings was investigated under drought stress. Before doing the experiment, initial characteristics of the two-year-old seedlings were measured after transferring them to Semnan and passing two months for stabilization in the greenhouse condition. Statistical analysis were performed with a completely randomized design under a factorial experiment using two factors of drought stress (field capacity 80%, 60%, 40% and 20%) and zinc nano oxide (concentrations 0, 30, 100, 300 and 1000 mg/l) with four replications. After twice spraying with zinc nano oxide with one-month interval and growing in greenhouse conditions for 6 months, all seedlings were measured and reassessed. The results showed that with increasing drought stress and nano oxide concentration, the number and longitudinal growth of leaves, height and diameter growth of seedlings and the number of seedling branches decreased, while the number of leaves and percentage of nano blight and the number of dried leaves increased. The best treatment in terms of growth and qualitative traits was related to the combination of irrigation with 40% of field capacity along with a concentration of 30 mg/l zinc nano oxide. The results also showed that only superoxide dismutase enzyme had a significant difference compared to the control with increasing drought stress at different concentrations of zinc nano oxide; however no significant difference was observed throughout other tested enzymes (catalase, ascorbate peroxidase and guaiacol peroxidase). Overall, due to the lack of prominent effect on seedling characteristics and creating the scorching spots on the leaf surface in some treatments, the use of zinc nano oxide is not recommended to improve the drought resistance, establishment and growth of oak seedlings.

Keywords: Forest restoration, enzyme activity, physiological traits, field capacity, seedling growth.

*Corresponding author Email: Kartooli58@semnan.ac.ir. Tel: +982333655560