نشریه علمی پژوهشی دانش کشاورزی و تولید پایدار
جلد ۳۴ شماره ۳ / پاییز ۱۴۰۳/ صفحات ۲۷۳-۲۶۳

The Effect of Nanosilicon Foliar Application on Morphological, Yield and Tolerance of Drought Stress in Quinoa Plant (*Chenopodium quinoa* L.)

Vahid Mohasseli [1*], Hojat Dialamy[2], Mahmood Izadi [2]

Received: 12 June 2023 Accepted: 22 September 2023
1- Assist. Prof., of Fars Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Shiraz, Iran.
*Corresponding Author Email: v.mohasseli@areeo.ac.ir

Abstract

Background and Objective: The present study was conducted with aim of investigating the effect of nanosilicon on yield the performance and reducing the effect caused by water stress in Quinoa plant.

Materials and Methods: The experiment was conducted as split plot based on randomized complete blocks design with three replications in Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. The treatments included irrigation regimes in four rounds of 7, 14, 21 and 28 days and nanosilicon spraying at zero, 30 and 60 mg L^{-1} levels.

Results: Application of irrigation cycles of 21 and 28 days compared to no stress (7 days) caused a decrease of 5.93 and 24.65% in panicle length, 8.77 and 27.81% in panicle width, 5.14 and 29.44% in panicle number, 12.05 and 23.87% in total aerial organ weight, 24.73 and 54.95% in seed yield, 26.11 and 55.94% in the weight of one thousand seeds and 14.53 and 41.16% in the plant harvest index. Also, nanosilicon foliar has a significant effect on Quinoa plant growth, so that the maximum morphological growth, grain yield and water consumption efficiency observed in nanosilicon application with concentration 30 mg L^{-1}.

Conclusion: Nanosilicon spraying with 30 mg L^{-1} concentration in beginning of clustering and granulation stages reduces the negative effects of moisture stress in irrigation cycles 21 and 28 days on the Quinoa plant. Spraying 30 mg L^{-1} of nanosilicon leds to a decrease in total aerial organ weight, seed yield and thousand seed weight respectively by 5.25%, 14.24% and 19.91% due to stress in 21 days irrigation cycle.

Keywords: Chemical Improver **,** Drought Stress, Grain Yield, Plant Growth

CC BY NC

DOI: 10.22034/SAPS.2023.57081.3064

اثر محلول‌پاشی نانوسیلیکون بر صفات مورفولوژیکی، عملکرد و تحمل تنش خشکی در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* L)

وحید محصلی [۱*]، حجت دیالمی[۱]، محمود ایزدی[۱]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۳۱

۱-استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
* مسئول مکاتبه: v.mohasseli@areeo.ac.ir

چکیده

اهداف: پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر نانوسیلیکون برعملکرد و کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه کینوا اجراء شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس اجراء گردید. تیمارها شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح با دور آبیاری‌های ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز و محلول‌پاشی نانوسیلیکون در سطوح صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در دو مرحله ابتدای خوشه‌دهی و ابتدای دانه‌بندی درنظر گرفته شد.

یافته‌ها: اعمال تنش رطوبتی با دور آبیاری ۲۱ و ۲۸ روز در مقایسه با عدم تنش (دور آبیاری ۷ روز) سبب کاهش ۵/۹۳ و ۲۴/۶۵ درصد در طول پانیکول، ۸/۷۷ و ۲۷/۸۱ درصد در عرض پانیکول، ۵/۱۴ و ۲۹/۴۴ درصد در تعداد پانیکول، ۱۲/۰۵ و ۲۳/۸۷ درصد در وزن کل اندام هوایی، ۲۴/۷۳ و ۵۴/۹۵ درصد در عملکرد دانه، ۲۶/۱۱ و ۵۵/۹۴ درصد در وزن هزار دانه و ۱۴/۵۳ و ۴۱/۱۶ درصد در شاخص برداشت گیاه گردید. همچنین محلول‌پاشی نانوسیلیکون تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رشد گیاه کینوا داشت بطوری که حداکثر ارتفاع بوته، طول, عرض و تعداد پانیکول، وزن کل اندام هوایی، عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب در محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری: محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در دو مرحله ابتدای خوشه‌دهی و دانه‌بندی سبب پایین آمدن اثرات منفی تنش‌های رطوبتی در شرایط تنش با دور آبیاری ۲۱ و ۲۸ روز در گیاه کینوا می‌گردد. محلول‌پاشی ۳۰ میلی‌گرم نانوسیلیکون در لیتر منجر به کاهش افت وزن کل اندام هوایی، عملکرد دانه و وزن هزار دانه به ترتیب به میزان ۲۵/۵، ۲۴/۱۴ و ۹۱/۱۹ درصد در اثر تنش در دور آبیاری ۲۱ روز گردید.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، رشد گیاه، عملکرد دانه، ماده بهبود دهنده شیمیایی

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa* L) گیاهی یک ساله که علاوه بر دانه از برگ آن نیز استفاده می‌شود (سپهوند و همکاران، ۲۰۱۵). با توجه به ارزش غذایی بالای کینوا و همچنین انعطاف‌پذیری فنولوژیکی، تنوع بالای ژنتیکی و همچنین توسعه مکانیزم‌های منحصر به فرد مقاومت به تنش خشکی در کینوا موجب دامنه بالای سازگاری این گیاه به شرایط مختلف اقلیمی به‌خصوص خشکی شده و علاقه جهانی به این محصول را افزایش داده است (رپو-کاراسکو و همکاران، ۲۰۰۳؛ سزن و همکاران، ۲۰۱۶). بدلیل سازگاری بالای ارقام کینوا با شرایط مختلف محیطی می‌توان از این گیاه به‌عنوان جایگزین مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده نمود (احمدی و همکاران، ۲۰۱۹).

پدیده کمبود آب در نقاط مختلف دنیا بر پتانسیل تولید گیاهان اثرگذار بوده و تنش خشکی می‌تواند اثرات مخرب شدیدی بر تمامی صفات مورفولوژیک و فیزیوبیوشیمیایی گیاه داشته باشد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ صدیق و همکاران، ۲۰۱۷). کمبود منابع آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده توسعه کشاورزی در ایران می‌باشد لذا کم‌آبیاری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها جهت مقابله با شرایط موجود مدنظر قرار گرفته است (عابدی و همکاران، ۲۰۰۲). تنش خشکی در مناطق مختلف سبب ایجاد محدودیت در کشت محصولات کشاورزی می‌گردد لذا انتخاب و کشت گیاهان زراعی متحمل به تنش خشکی رویکردی مناسب جهت حفظ و یا افزایش تولید محصولات در مناطق تحت تنش کمبود آب می‌باشد (جان گروانگ‌لانگ و همکاران، ۲۰۱۳). راهکار سازگاری گیاهان به تنش خشکی از طریق فرار، اجتناب و تحمل به خشکی است. عکس‌العمل گیاهان نسبت به خشکی وابسته به نوع گیاه، شدت و مدت تنش خشکی است (کویرس، ۲۰۱۵). مطالعات علی و همکاران (۲۰۱۸) بر روی گیاه کینوا در کشور عربستان سعودی نشان داد که کاهش میزان آب آبیاری سبب کاهش در طول ریشه، ارتفاع، وزن تر اندام هوایی و عملکرد دانه گردید. در تحقیقی دیگر نیز مشاهده شد که اعمال تیمار کم‌آبیاری بر روی گیاه کینوا رقم تیتیکاکا سبب کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی، عملکرد دانه و وزن هزار دانه شد (جمالی، ۲۰۱۶). عزیز و همکاران (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند که کم‌آبیاری بر خواص رشدی گیاه کینوا تأثیر منفی بر جای گذاشت بطوری که اعمال تنش خشکی منجر به کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی و ارتفاع بوته گردید. همچنین کاهش در ارتفاع بوته و وزن تر و خشک اندام هوایی در چهار ژنوتیپ گیاه کینوا در شرایط تنش خشکی توسط اقبال و همکاران (۲۰۱۹) نیز گزارش شده است. مطالعات جایمی اولیویرا و همکاران (۲۰۱۷) در کشور برزیل نشان داد که اعمال تیمار کم‌آبیاری به‌میزان ۵۰ درصد بر روی گیاه کینوا سبب کاهش در ارتفاع بوته، زیست توده و عملکرد دانه شد.

به‌نظر می‌رسد که کاربرد برخی از عناصر غذایی مانند سیلیسیم در شرایط تنش آبی که کاهش رشد و عملکرد گیاهان را به دنبال دارد می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مناسب جهت تعدیل یا کاهش آثار منفی ناشی از این تنش محسوب شود. از نظر فراوانی سیلیسیم دومین عنصر بعد از اکسیژن در خاک بوده و هرچند در بسیاری از گیاهان در شرایط بهینه و طبیعی، به‌عنوان یک عنصر ضروری مطرح نیست اما کاربرد منابع خارجی این عنصر می‌تواند منجر به ارتقاء رشد و افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی شود (هادی و همکاران، ۲۰۱۶). استفاده از نانو ذرات سیلیسیم جهت تحریک رشد و نمو گیاه و همچنین کاهش آسیب-های ناشی از تنش‌های محیطی از قبیل تنش خشکی در گیاهان شناخته شده است (رایچوهری، ۲۰۲۰). محققان تأثیر مثبت سیلیسیم بر رشد گیاه را به اثر این ماده در افزایش حجم و وزن ریشه‌ها، نسبت دادند (داکورا و نلوامودو، ۲۰۰۳). لیو و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که مصرف سیلیسیم سبب افزایش استحکام برگ‌ها، غلظت کلروفیل و سرعت فتوسنتز در گیاه شده و همچنین پیری در برگ‌ها را به تأخیر می‌اندازد. نتایج پارساپور و همکاران (۲۰۱۹) بیانگر تعدیل اثر منفی تنش آبی بر عملکرد گیاه توسط محلول‌پاشی نانوسیلیکون می‌باشد.

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و با در نظر گرفتن خشکسالی‌های اخیر، نیاز به راهکارهایی جهت استفاده حداکثری از آب در دسترس بوده که یکی از این راهکارها اعمال تنش آبی یا کم‌آبیاری است. همچنین بررسی اثر نانوسیلیکون در کاهش یا تعدیل اثر ناشی از تنش آبی می‌تواند برای مدیریت بهتر کم‌آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب موجود در کشور مفید باشد. از این‌رو با توجه به ارزش غذایی گیاه کینوا پژوهش فوق با هدف بررسی اثر نانوسیلیکون بر گیاه کینوا در شرایط تنش آبی اجراء شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع

طبیعی فارس واقع در شهرستان پاسارگاد استان فارس با مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۸ دقیقه شرقی و ۳۰ درجه و ۱ دقیقه شمالی و ۱۷۸۷ متر ارتفاع از سطح دریا اجراء گردید. اطلاعات هواشناسی محل اجرای آزمایش در جدول ۱ آورده شده است. همچنین جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه قبل از کشت اقدام به نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری از نقاط مختلف مزرعه نموده که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای جوی ثبت شده محل اجرای آزمایش در سال ۱۴۰۰ (مأخذ: ایستگاه کلیماتولوژی علی‌آباد)

ماه‌ها	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	مجموع
بارندگی (mm)	۰/۴	۴/۰	–	۳/۸	۲/۴	–	–	۰/۲	۲۷/۴	۳۳/۱	۸۰/۰	۲۲/۰	۱۷۳/۳
میانگین دما (C°)	۱۷/۷	۲۱/۸	۲۸/۴	۲۹/۸	۲۷/۸	۲۳/۹	۱۸/۴	۱۱/۱	۷/۵	۳/۱	۳/۴	۱۶/۳	۱۷/۴۳

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

ویژگی‌ها	شن	سیلت	رس	بافت خاک	هدایت الکتریکی	pH	کربن آلی	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	منگنز	مس
	(٪)				($dS.m^{-1}$)		(٪)	($mg.Kg^{-1}$)					
مقدار	۱۹/۱	۵۹/۳	۲۱/۶	لومی سیلتی	۱/۷	۷/۹	۰/۵۵	۹/۵	۲۵۶/۸	۶/۷	۲/۴	۰/۶۱	۰/۵۲

تیمارها شامل رژیم‌های آبیاری در چهار سطح با دور آبیاری‌های ۷ (شاهد)، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز یک بار و همچنین محلول‌پاشی نانوسیلیکون در سطوح صفر (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد)، ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. محلول‌پاشی نانوسیلیکون در دو مرحله ابتدای خوشه‌دهی و ابتدای دانه‌بندی به‌صورت یکنواخت و با استفاده از سم‌پاش کوله‌ای انجام شد. نانوسیلیکون ($Nano\text{-}SiO_2$) با اندازه ذرات ۳۰-۲۰ نانومتر محصول شرکت آمریکایی US Research Nanomaterial بوده که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه گردید. به‌دلیل حلالیت بهتر نانوسیلیکون در آب، ابتدا در آب دی‌یونیزه به‌صورت معلق درآمده و با استفاده از لرزش و ارتعاشات دستگاه اولتراسونیک (۱۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه) نانوسیلیکون در دو غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر محلول گردید (پراساد و همکاران ۲۰۱۲). آبیاری اول (خاک آب) و دو آبیاری سبک (جهت جلوگیری از سله بستن خاک) برای کل مزرعه به‌صورت یکسان انجام شد و اعمال تیمارهای مختلف آبیاری پس از اطمینان از استقرار کامل بوته‌ها در مزرعه صورت گرفت. آبیاری به شیوه نشتی و با استفاده از سیفون و با نصب کنتور براساس تیمار مربوط انجام شد. کرت‌های آزمایشی در ابعاد ۷*۳ متر طراحی شدند. به‌منظور اطمینان از عدم تداخل آب آبیاری به کرت‌های مجاور، فاصله بین کرت‌ها ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. کشت کینوا (رقم تیتیکاکا) به‌صورت بذری در اوایل مرداد ماه سال ۱۴۰۰ با فاصله خطوط کشت ۲۵ سانتی‌متر (فاصله روی ردیف ۵ سانتی‌متر) انجام شد. براساس نتایج آزمون خاک میزان ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار در طول فصل رشد و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات تریپل و سولفات پتاسیم قبل از کشت به خاک اضافه گردید. در طول مدت آزمایش وضعیت رشد گیاهان مورد بررسی و یادداشت برداری‌های لازم انجام

شد. پس از اتمام دوره آزمایش (اواخر آبان ماه)، گیاهان به‌صورت دستی در کوادرات‌های یک متر مربعی در سه تکرار از هر تیمار برداشت و سپس ارتفاع بوته، طول، عرض و تعداد پانیکول در هر بوته اندازه‌گیری و پس از خشک شدن، وزن کل اندام هوایی (عملکرد زیستی)، عملکرد دانه و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. همچنین شاخص برداشت (معادله ۱) و بهره‌وری فیزیکی مصرف آب مبتنی بر عملکرد دانه برداشت شده (معادله ۲) نیز محاسبه گردید. در معادله ۱ و ۲، به‌ترتیب GY،HI ، WP،BY و CWR بیانگر شاخص برداشت، عملکرد دانه ($Kg\ ha^{-1}$)، عملکرد بیولوژیک ($Kg\ ha^{-1}$)، بهره‌وری مصرف آب ($Kg\ m^{-3}$) و آب مصرفی ($m^3\ ha^{-1}$) است. در نهایت داده‌های بدست آمده را با نرم‌افزار SPSS 27 مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن ($p < 0.01$) استفاده شد. همچنین رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

معادله (۱) $$HI = \frac{GY}{BY} \times 100$$

معادله (۲) $$\wp = \frac{GY}{CWR}$$

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

بر اساس نتایج تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه (جدول ۳) تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و سطوح نانوسیلیکون بر ارتفاع گیاه کینوا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با تغییر دور آبیاری از ۷ به ۱۴ روز، ارتفاع بوته در گیاه کینوا افزایش اما با بالا رفتن دور آبیاری (۲۱ و ۲۸ روز) ارتفاع گیاه کاهش یافت (جدول ۴). میانگین ارتفاع گیاه کینوا در شرایط تنش با دور آبیاری‌های ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز نسبت به شرایط عدم تنش (دور آبیاری ۷ روز) به‌ترتیب ۷/۵۴، ۰/۴۹ درصد افزایش و ۶/۵۷ درصد کاهش نشان داد. کاهش ارتفاع گیاه در تنش‌های شدید رطوبتی می‌تواند به دلیل کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از خاک و همچنین کاهش جذب دی‌اکسیدکربن به دلیل بسته شدن روزنه‌ها در شرایط خشکی و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز و کربوهیدرات‌های تولید شده طی فرآیند فتوسنتز باشد. به‌طور عمده از اثرات اولیه تنش خشکی اختلال در جذب آب و مواد معدنی، هدایت روزنه‌ای و تولیدات فتوسنتز و کاهش رشد گیاه است (کوسوران ۲۰۱۲). اعمال نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب موجب ۱۰/۳۸ و ۷/۶۵ درصد افزایش در ارتفاع بوته گردید. بر اساس نتایج حاصل از انجام این پژوهش حداکثر ارتفاع گیاه (۷۵/۳۳ سانتی‌متر) در شرایط دور آبیاری ۱۴ روز و محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر و حداقل آن (۶۰/۶۷ سانتی‌متر) در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز و بدون محلول‌پاشی می‌باشد که در واقع معادل ۱۶/۸۴ درصد افزایش نسبت به شاهد است (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد غلظت‌های مختلف نانوسیلیکون به‌طور معنی‌داری نسبت به عدم کاربرد، ارتفاع گیاه را افزایش داد. کاهش فشار آماس در شرایط تنش آبی منجر به کاهش انبساط سلولی شده که در نهایت منجر به کاهش پارامترهای رشد گیاه مانند ارتفاع گیاه، وزن کل اندام هوایی و عملکرد دانه می‌شود (تایز و زیگر، ۲۰۱۲). علاوه بر این گیاهان در تنش خشکی قادر به حفظ خود در برابر دیگر تنش‌های زیستی یا غیر زیستی نیستند در نتیجه بهره‌وری گیاه بیشتر محدود می‌شود (رامگودا و سنتیل‌کومار، ۲۰۱۵).

طول، عرض و تعداد پانیکول

اثر رژیم‌های مختلف آبیاری و سطوح نانوسیلیکون بر طول، عرض و تعداد پانیکول در گیاه کینوا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین طول (۱۵/۳۳ سانتی‌متر)، عرض (۷/۲۳ سانتی‌متر) و تعداد پانیکول (۵/۶۰) به‌ترتیب در شرایط دور آبیاری ۱۴ روز و محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت‌های ۳۰، ۶۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر و کمترین طول (۸/۸۰ سانتی‌متر)، عرض (۳/۶۷ سانتی‌متر) و تعداد پانیکول (۲/۷۰) در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز و بدون محلول‌پاشی نانوسیلیکون مشاهده گردید (جدول ۴).

جدول۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورفولوژیکی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در گیاه کینوا تحت تأثیر نانوسیلیکون و رژیم‌های مختلف آبیاری

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع بوته	طول پانیکول	عرض پانیکول	تعداد پانیکول	وزن کل اندام هوایی	عملکرد دانه	وزن هزار دانه	شاخص برداشت	بهره‌وری مصرف آب
تکرار	۲	۱/۰۲۸ ns	۰/۲۴۱ ns	۰/۲۸۷ *	۰/۱۶۱ ns	۰/۱۱۲ ns	۰/۰۰۲ ns	۰/۰۲۰ ns	۲/۱۲۱ ns	۰/۰۰۰
رژیم‌های آبیاری	۳	۱۳۷/۲۱۳**	۲۹/۸۲۹**	۹/۸۱۳**	۶/۲۶۱**	۱۵/۴۶۴**	۹/۷۶۶**	۱۱/۵۳۵**	۴۸۹/۵۰۴**	۰/۷۰۴**
خطای (الف)	۶	۱/۹۹۱	۰/۲۱۲	۰/۲۱۵	۰/۱۶۵	۰/۰۴۳	۰/۰۲۳	۰/۰۵۱	۲/۶۵۴	۰/۰۰۳
نانوسیلیکون	۲	۱۴۳/۳۶۱**	۲۳/۰۴۳**	۴/۴۸۰**	۳/۰۵۱**	۳/۳۰۰**	۱/۰۹۰ **	۰/۷۷۳**	۴۹/۰۰۶**	۰/۱۴۸**
رژیم‌های آبیاری × نانوسیلیکون	۶	۷/۹۹۱ ns	۰/۴۹۴ ns	۰/۳۳۱**	۰/۰۶۹ ns	۰/۰۸۶ ns	۰/۰۸۱**	۰/۱۷۸*	۱۲/۹۵۴**	۰/۰۲۵**
خطای (ب)	۱۶	۷/۱۶۷	۰/۷۹۵	۰/۰۷۰	۰/۱۰۶	۰/۱۴۸	۰/۰۱۶	۰/۰۵۰	۲/۴۲۰	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (٪)	-	۷/۳۴	۹/۰۵	۱۹/۵۶	۲۱/۹۳	۱۳/۸۹	۱۹/۸۲	۲۵/۸۰	۲۰/۱۷	۲۹/۸۹

ns ، * و ** به‌ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌دار، معنی‌دار درسطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

جدول ۴- اثر نانوسیلیکون و رژیم‌های مختلف آبیاری بر صفات مورفولوژیکی گیاه کینوا

سطوح نانوسیلیکون ($mg\ L^{-1}$)	رژیم‌های مختلف آبیاری (روز) ۷	۱۴	۲۱	۲۸	میانگین
	ارتفاع بوته (Cm)				
صفر	۶۴/۳۳ c	۶۸/۶۷ b	۶۳/۰۰ c	۶۰/۶۷ c	۶۴/۱۷ B
۳۰	۷۰/۶۷ b	۷۴/۶۷ a	۷۰/۶۷ b	۶۷/۳۳ bc	۷۰/۸۳ A
۶۰	۶۸/۳۳ b	۷۵/۳۳ a	۷۰/۶۷ b	۶۲/۰۰ c	۶۹/۰۸ A
میانگین	۶۷/۷۸ B	۷۲/۸۹ A	۶۸/۱۱ B	۶۳/۳۳ C	
	طول پانیکول (Cm)				
صفر	۱۱/۴۷ b	۱۲/۴۳ ab	۱۰/۳۰ bc	۸/۸۰ c	۱۰/۷۵ B
۳۰	۱۳/۹۷ a	۱۵/۳۳ a	۱۳/۵۷ a	۱۱/۰۳ b	۱۳/۴۸ A
۶۰	۱۳/۵۰ a	۱۴/۴۳ a	۱۲/۷۷ ab	۹/۵۰ bc	۱۲/۵۵ A
میانگین	۱۲/۹۸ AB	۱۴/۰۷ A	۱۲/۲۱ B	۹/۷۸ C	
	عرض پانیکول (Cm)				
صفر	۵/۱۳ b	۶/۱۳ ab	۵/۰۰ b	۳/۶۷ c	۴/۹۸ B
۳۰	۶/۹۳ a	۷/۱۷ a	۵/۶۰ b	۴/۴۷ bc	۶/۰۴ A
۶۰	۶/۰۷ ab	۷/۲۳ a	۵/۹۳ b	۴/۹۳ bc	۶/۰۴ A
میانگین	۶/۰۴ AB	۶/۸۴ A	۵/۵۱ B	۴/۳۶ C	
	تعداد پانیکول				
صفر	۳/۷۷ b	۴/۸۷ ab	۳/۶۰ b	۲/۷۰ c	۳/۷۳ B
۳۰	۴/۸۳ ab	۵/۶۰ a	۴/۶۳ ab	۳/۶۳ b	۴/۶۸ A
۶۰	۴/۲۳ b	۴/۶۷ ab	۳/۹۳ b	۲/۷۳ c	۳/۸۹ B
میانگین	۴/۲۸ AB	۵/۰۴ A	۴/۰۶ B	۳/۰۲ C	
	وزن کل اندام هوایی ($Kg\ ha^{-1}$)				
صفر	۹۶۶۶/۷ b	۱۰۰۰۰/۰ ab	۸۲۳۳/۳ c	۷۰۳۳/۳ d	۸۷۳۳/۳ B
۳۰	۱۰۴۳۳/۳ a	۱۰۹۶۶/۷ a	۹۴۳۳/۳ b	۸۰۶۶/۷ c	۹۷۲۵/۰ A
۶۰	۹۵۰۰/۰ b	۱۰۴۳۳/۳ a	۸۳۶۶/۷ c	۷۴۳۳/۳ cd	۸۹۳۳/۳AB
میانگین	۹۸۶۶/۷ A	۱۰۴۶۶/۷ A	۸۶۷۷/۸ B	۷۵۱۱/۱ C	

برای هر یک از پاسخ‌های گیاهی، میانگین‌هایی که در هر ردیف و یا در هر ستون در یک حرف بزرگ و یا میانگین‌هایی که در متن جدول در یک حرف کوچک مشترک هستند، طبق آزمون دانکن در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

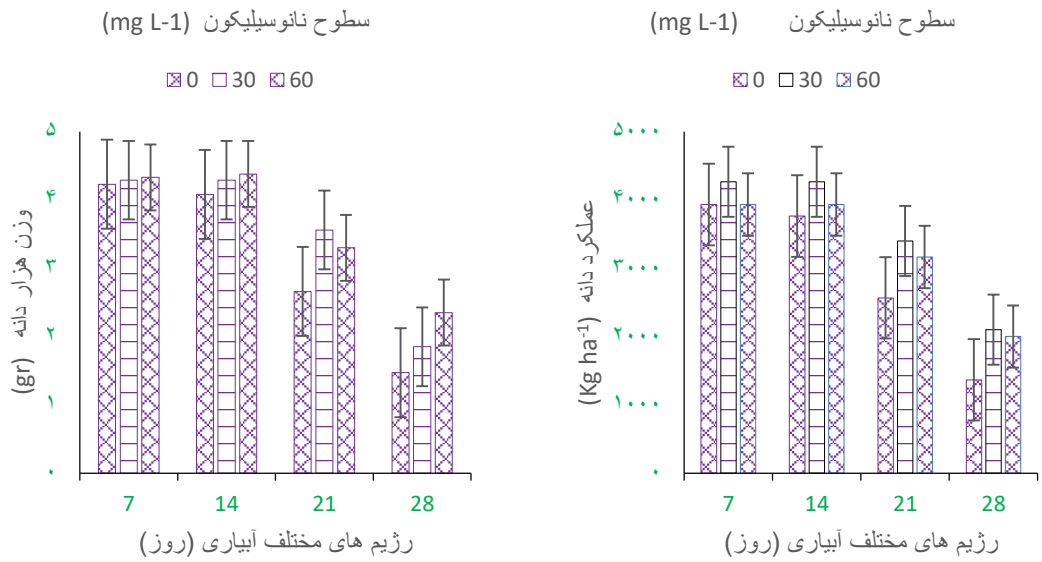
مقایسه میانگین‌ها نشان داد که پاسخ‌های گیاهی فوق در شرایط دور آبیاری ۲۱ و ۲۸ روز به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد (عدم تنش) کاهش یافت به‌طوری که این میزان کاهش در طول پانیکول به‌ترتیب ۵/۹۳ و ۲۴/۶۵ درصد، در عرض پانیکول به‌ترتیب ۸/۷۷ و ۲۷/۸۱ درصد و در تعداد پانیکول به‌ترتیب ۵/۱۴ و ۲۹/۴۴ درصد بدست آمد. از طرفی دیگر مصرف نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر سبب افزایش معنی‌داری در طول، عرض و تعداد پانیکول به‌ترتیب به‌میزان ۲۵/۴۰، ۲۱/۲۹ و ۲۵/۴۷ درصد گردید (جدول ۴).

وزن کل اندام هوایی

تنش‌های رطوبتی و محلول‌پاشی نانوسیلیکون اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر وزن کل اندام هوایی گیاه کینوا برجای گذاشت (جدول ۳). بررسی نتایج این پژوهش نشان داد که تنش رطوبتی بر وزن کل اندام هوایی گیاه کینوا تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد داشت به‌طوری که در شرایط دور آبیاری ۲۱ و ۲۸ روز در مقایسه با شاهد به‌ترتیب به میزان ۱۲/۰۵ و ۲۳/۸۷ درصد کاهش نشان داد (جدول ۴). حداقل (۹/۵۸ درصد) و حداکثر (۲۷/۲۴ درصد) کاهش در وزن کل اندام هوایی گیاه در اثر تنش رطوبتی به‌ترتیب مربوط به محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط دور آبیاری ۲۱ روز و عدم کاربرد نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز بدست آمد. تحقیقات نشان داده است که کاهش وزن اندام هوایی در شرایط تنش آبی می‌تواند به دلیل فشار آماس سلولی ناشی از کاهش سطح برگ گیاه و همچنین کاهش میزان فتوستنز باشد (لولار و کورنیک، ۲۰۰۲). همچنین گزارش شده است که تنش آبی سبب کاهش سطح برگ و در نتیجه پایین آمدن جذب نور توسط پوشش گیاهی و بدنبال آن کاهش وزن اندام هوایی گیاه گردیده است (رادریگس و همکاران ۲۰۱۰). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت‌های ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نسبت به عدم کاربرد، وزن کل اندام هوایی را به‌ترتیب ۱۱/۳۶ و ۲/۲۹ درصد افزایش داد (جدول ۴). بیشترین وزن اندام هوایی گیاه (۱۰۹۶۶/۷ کیلوگرم در هکتار) مربوط به محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط دور آبیاری ۱۴ روز بدست آمد که در واقع معادل ۹/۶۷ درصد افزایش در وزن اندام هوایی نسبت به شاهد می‌باشد. کمترین وزن اندام هوایی (۷۰۳۳/۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به عدم محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز بدست آمد. حداقل (۱/۶۲ درصد) و حداکثر (۱۴/۶۹ درصد) افزایش در وزن کل اندام هوایی گیاه در اثر مصرف نانوسیلیکون به‌ترتیب مربوط به محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۶۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط دور آبیاری ۲۱ روز و محلول‌پاشی با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز بدست آمد.

عملکرد و وزن هزار دانه

با توجه به نتایج مندرج در جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر تنش خشکی و محلول‌پاشی نانوسیلیکون بر عملکرد دانه و وزن هزار دانه کینوا در سطح یک درصد معنی‌دار بدست آمد. همچنین اثرات متقابل تنش خشکی و کاربرد نانوسیلیکون بر صفات فوق در سطح احتمال یک درصد دارای اختلاف معنی‌دار آماری بود. همانطور که در شکل یک مشاهده می‌گردد اعمال شرایط دور آبیاری‌های ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز، میانگین عملکرد دانه کینوا را نسبت به شاهد به ترتیب به میزان ۱/۳۷، ۲۴/۷۳ و ۵۴/۹۵ درصد کاهش داد. هر چند کاهش عملکرد دانه در اثر تنش رطوبتی در شرایط بدون مصرف نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز نسبت به عدم تنش به‌ترتیب ۴/۲۳، ۳۴/۷۵ و ۶۵/۲۵ درصد بدست آمد اما این کاهش عمکرد دانه در شرایط محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب صفر، ۲۰/۳۱ و ۵۰/۷۸ درصد و با محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم نانوسیلیکون در لیتر به‌ترتیب صفر، ۱۹/۴۹ و ۴۹/۱۵ درصد مشاهده گردید که بیانگر نقش نانوسیلیکون در تعدیل نمودن اثر منفی تنش رطوبتی در کاهش عملکرد دانه در گیاه کینوا می‌باشد.



شکل ۱- اثر نانوسیلیکون و رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد دانه و وزن هزار دانه کینوا

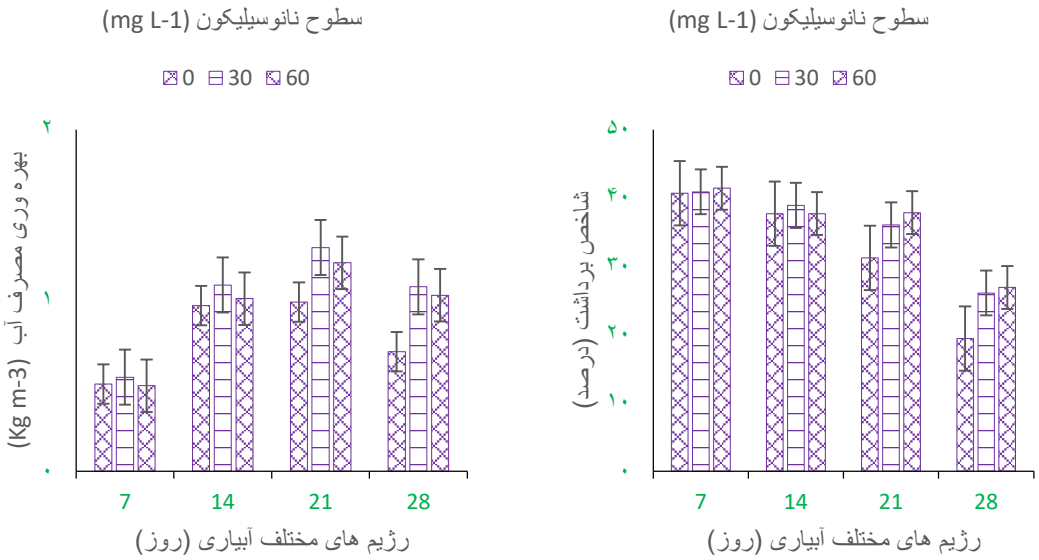
نتایج اثر نانوسیلیکون بر عملکرد دانه نشان داد که با محلول‌پاشی نانوسیلیکون میزان عملکرد دانه نیز افزایش می‌یابد به‌طوری که در غلظت ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر میزان افزایش میانگین عملکرد دانه نسبت به شاهد به‌ترتیب ۲۰/۶۳ و ۱۲/۰۳ درصد مشاهده شد (شکل ۱). حداکثر (۴۲۶۶/۶۷ کیلوگرم در هکتار) و حداقل (۱۳۶۶/۶۷ کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه در گیاه کینوا به‌ترتیب مربوط محلول‌پاشی نانوسیلیکون با غلظت ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در شرایط دور آبیاری ۱۴ روز و عدم محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز بدست آمد.

اعمال تنش رطوبتی بر وزن هزار دانه نیز تأثیر معنی‌داری از نوع منفی برجای گذاشت بطوری که در دور آبیاری ۲۱ روز، وزن هزار دانه نسبت به شاهد ۲۶/۱۱ درصد و در دور آبیاری ۲۸ روز نسبت به شاهد ۵۵/۹۴ درصد کاهش نشان داد (شکل ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که مصرف ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در مقایسه با سطح صفر آن به‌ترتیب سبب افزایش وزن هزار دانه به میزان ۱۲/۵۴ و ۱۵/۴۳ درصد گردید. بیشترین وزن هزار دانه (۴/۳۸ گرم) در شرایط دور آبیاری ۱۴ روز و با محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم نانوسیلیکون در لیتر حاصل گردید که نسبت به کمترین وزن هزار دانه (۱/۴۷ گرم) که در تیمار بدون مصرف نانوسیلیکون و در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز مشاهده شد، ۱۹۷/۹۶ درصد افزایش را نشان می‌دهد (شکل ۱).

شاخص برداشت و بهره‌وری مصرف آب

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) تأثیر تنش‌های مختلف رطوبتی و محلول‌پاشی نانوسیلیکون و همچنین برهمکنش آن‌ها بر شاخص برداشت و بهره‌وری مصرف آب در گیاه کینوا در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بدست آمد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اعمال تنش رطوبتی سبب کاهش در شاخص برداشت در گیاه کینوا می‌گردد (شکل ۲). بطور میانگین شاخص برداشت در شرایط دور آبیاری‌های ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز نسبت به عدم تنش به‌ترتیب ۷/۰۷، ۱۴/۵۳ و ۴۱/۱۶ درصد کاهش نشان داد. حداکثر شاخص برداشت (۴۱/۴۳ درصد) مربوط به تیمار محلول‌پاشی ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۷ روز (عدم تنش رطوبتی) و حداقل آن (۱۹/۴۱ درصد) مربوط به بدون مصرف نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز مشاهده گردید که بیانگر ۱۱۳/۴۵ درصد اختلاف می‌باشد. مقایسه میانگین‌های شاخص برداشت در گیاه نیز نشان داد که علی‌رغم کاهش آن در اثر تنش رطوبتی اما

مصرف نانوسیلیکون توانسته است میزان شاخص برداشت را در گیاه کینوا نسبت به شاهد، افزایش دهد بطوری که مصرف ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون نسبت به شاهد به‌ترتیب سبب ۱۰/۰۱ و ۱۱/۵۳ درصد افزایش در آن گردید (شکل ۲).



شکل ۲- اثر نانوسیلیکون و رژیم‌های مختلف آبیاری بر شاخص برداشت و بهره‌وری مصرف آب در کینوا

بهره‌وری مصرف آب با اعمال تنش رطوبتی در ابتدا افزایش و سپس در شرایط دور آبیاری ۲۸ روز کاهش نشان داد بطوری که در شرایط دور آبیاری‌های ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روز نسبت به شاهد به‌ترتیب ۹۶/۱۵، ۱۲۵ و ۷۸/۸۴ درصد افزایش یافت (شکل ۲). از طرف دیگر محلول‌پاشی نانوسیلیکون سبب افزایش بهره‌وری مصرف آب در گیاه کینوا گردید. کاربرد نانوسیلیکون به‌صورت برگ‌پاشی در غلظت‌های ۳۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب سبب ۲۶/۵۸ و ۱۸/۹۹ درصد افزایش در بهره‌وری مصرف آب در گیاه شد. حداکثر بهره‌وری مصرف آب (۱/۳۱ کیلوگرم در مترمکعب) مربوط به محلول‌پاشی ۳۰ میلی-گرم در لیتر نانوسیلیکون در شرایط دور آبیاری ۲۱ روز و حداقل آن (۰/۵۰ کیلوگرم در مترمکعب) مربوط به عدم مصرف نانوسیلیکون در شرایط بدون تنش رطوبتی می-باشد که بیانگر ۱۶۲ درصد افزایش است.

نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که اعمال تنش رطوبتی در شرایط دور آبیاری ۲۱ و ۲۸ روز بر ارتفاع، طول، عرض و تعداد پانیکول، وزن کل اندام هوایی، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و شاخص برداشت در گیاه کینوا تأثیر منفی بر جای گذاشت. از طرفی دیگر کاربرد نانوسیلیکون به‌صورت برگ‌پاشی سبب افزایش شاخص‌های فوق در شرایط عدم تنش و تنش رطوبتی گردید. بطور کلی می‌توان گفت که نانوسیلیکون بدلیل تأثیر در ارتقاء رشد و افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی می‌تواند نقش موثری در پایین آوردن اثرات منفی تنش‌های رطوبتی در گیاهان داشته باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیریت محترم پردیس آموزشی علی-آباد کمین واقع در شهرستان پاسارگاد، که صمیمانه ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند قدردانی می‌نماییم.

منابع مورد استفاده

Abedi MJ, Nairizi S, Ebrahimi Birang N, Maherani M, Khaledi H, Mehrdadi N and Cheraghi AM. 2002 Saline Water Utilization in Sustainable Agriculture. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, 224p.

Ahmadi SH, Solgi S and Sepaskhah AR. 2019. Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. Agricultural Water Management, 225: 105784.

Aly AA, Al-Barakah FN and El-Mahrouky MA. 2018. Salinity Stress Promote Drought Tolerance of Chenopodium Quinoa Willd. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 49(11): 1331-1343.

Aziz A, Akram NA and Ashraf M. 2018. Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants under water deficit regimes. Plant Physiology and Biochemistry, 123: 192-203.

Dakora FD and Nelwamondo A. 2003. Silicon nutrition promotes root growth and tissue mechanical strength in symbiotic cowpea. Functional Plant Biology, 30 (9): 947-953.

Hadi H, Seyed Sharifi R and Namvar A. 2016. Phytoprotectants and Abiotic Stresses. Urmia University press, 342p.

Iqbal S, Basra SM, Afzal I, Wahid A, Saddiq MS, Hafeez MB and Jacobsen SE. 2019. Yieldpotential and salt tolerance of quinoa on salt-degraded soils of Pakistan. Journal of Agronomy and Crop Science, 205 (1): 13-21.

Jamali S. 2016. Investigating the combined effect of different levels of salinity and irrigation low on the yield and yield components of Quinoa plant. Master's thesis in irrigation and drainage. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian).

Jayme-Oliveira A, Ribeiro Júnior WQ, Ramos MLG, Ziviani AC and Jakelaitis A. 2017. Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 52(8): 561-571.

Jongrungklang N, Toomsan B, Vorasoot N, Jogloy S, Boote KJ, Hoogenboom G and Patanothai A. 2013. Drought tolerance mechanisms for yield responses to pre-flowering drought stress of peanut genotypes with different drought tolerant levels. Field Crops Research, 144: 34-42.

Kooyers NJ. 2015. The evolution of drought escape and avoidance in natural herbaceous populations. Plant Science, 234: 155-162.

Kusvuran S. 2012. Effects of drought and salt stresses on growth, stomatal conductance, leaf water and osmotic potentials of melon genotypes (*Cucumis melo* L.). African Journal of Agricultural Research, 7(5): 775-781.

Lawlor DW and Cornic G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plant. Plant Cell & Environment, 25: 249-279.

Liu F, Andersen MN and Jensen CR. 2004. Root signal controls pod growth in droughtstressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development. Field Crop Research, 85:159-166.

Parsapour O, Bakhshandeh AM, Gharineh MH, Feizi H and Moradi Telavat MR. 2019. The effect of foliar application of nano- and bulk silicon dioxide particles on grain yield and redistribution of dry matter in wheat under drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences, 12 (2): 377-388.

Prasad TN, Sudhakar P, Sreenivasulu Y, Latha P, Munaswamy V, Raja Reddy K, Sreeprasad TS and Sajanlal PR. 2012. Effect of nanoscale Zinc-oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. Journal of Plant Nutrition, 35: 905-927.

Ramegowda V and Senthil-Kumar M. 2015. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination. J. Plant Physiology, 176: 47- 54.

Repo-Carrasco R, Espinoza C and Jacobsen S E. 2003. Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). Food Reviews International, 19 (1-2): 179-189.

Rodrigues JG, Edvardo PMJ, Forner B and Angeles F. 2010. Citrus rootstock response to water stress. Scientia Horticulturae, 126: 95-102.

Roychoudhury A. 2020. Silicon-nanoparticles in crop improvement and agriculture. International Journal on Recent Advancement in Biotechnology & Nanotechnology, 3: 54-65.

Sadiq M, Akram NA, Ashraf M and Ali S. 2017. Tocopherol confers water stress tolerance: sugar and osmoprotectant metabolism in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. Agrochimica, 61 (1): 28-42.

Sephovand NA, Serhangi M, Mehrabi A and Mustafavi Kh. 2015. Investigating the genetic diversity of Quinoa morphotypes using microsatellite molecular markers. New genetics, 10 (1): 115-122. (In Persian).

Sezen SM, Yazar A, Tekin S and Yildiz M. 2016. Use of drainage water for irrigation of quinoa in a Mediterranean environment. In Proceedings of 2nd World Irrigation Forum (WIF2), pp. 6-8.

Song Q, Liu C, Bachir DG, Chen L and Hu YG. 2017. Drought resistance of new synthetic hexaploid wheat accessions evaluated by multiple traits and antioxidant enzyme activity. Field Crops Research, 210: 91-103.

Taiz L and Zeiger E. 2012. Plant Physiology. Sinauer Associates Inc., Publishers, Sunderland, MA, pp. 769.