

اثر تنش خشکی و سولفات پتاسیم بر عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا

سید فاطمه موسوی ساردو^۱، عیسی خمیری^{۲*}، سید محسن موسوی نیک^۳، علی اکبر مقصودی^۴، مریم اله‌دو^۴

۱- دانشجوی دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۴- گروه اصلاح نباتات و بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

* مسئول مکاتبه: ikhammari@uoz.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.356951.1277

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

چکیده

به منظور کاهش آسیب ایجاد شده به وسیله تنش خشکی در گیاه کینوا، آزمایشی به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ انجام شد. فاکتور اصلی شامل سه سطح تیمار آبیاری (آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل به عنوان شاهد، آبیاری تا شروع مرحله گل‌دهی و آبیاری تا مرحله خمیری نرم) و فاکتور فرعی شامل دو سطح کود سولفات پتاسیم (۸ کیلوگرم در هزار متر مربع و عدم کاربرد آن) بود. اثر فاکتور آبیاری و سولفات پتاسیم بر روی عملکرد دانه و کلیه صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد دانه (۲/۳۰۹ تن در هکتار) در گیاهان شاهد و کمترین آن (۱/۳۶۶ تن در هکتار) در شرایط آبیاری تا شروع مرحله گل‌دهی مشاهده شد. این نتایج نشان داد که تنش خشکی اثر زیان‌آوری بر روی عملکرد دانه داشته، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی را کاهش و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، نشت یونی و محتوای مالون دی‌آلدهید را افزایش داد. کاربرد کود سولفات پتاسیم منجر به افزایش عملکرد دانه شد. بطوری‌که عملکرد دانه در هر سه تیمار آبیاری به طور میانگین ۲۵/۸ درصد نسبت به عدم کاربرد کود افزایش نشان داد که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب این کود بر روی عملکرد دانه کینوا می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه تنش خشکی صفات فیزیولوژیک را تحت تأثیر قرار داده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه گیاه کینوا می‌شود، برای جبران اثرات زیان‌آور آن می‌توان از کود سولفات پتاسیم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، تنش کمبود آب، رنگیزه‌های فتوسنتزی، کود پتاسیم

مقدمه

جهان ایجاد می‌کند (Mirjahanmardi and Ehsanzadeh, 2016). این تنش رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پتانسیل آبی، تقسیم سلولی، فتوسنتز خالص و سنتز پروتئین را کاهش می‌دهد، تعادل هورمونی بافت اصلی گیاه را تغییر می‌دهد و منجر به کاهش عملکرد از طریق کاهش بیوماس کل، محتوای نسبی آب و محتوای کلروفیل می‌شود (Abdallah et al., 2019). گزارش شده است که تنش خشکی منجر به کاهش عملکرد گیاه کینوا شامل ارتفاع گیاه، وزن هزاردانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت شده است (El-Shamy et al., 2022). کاهش عملکرد دانه در سایر گیاهان مانند کلزا (Mirzaei et al., 2013) و کنجد (Ghotbzadeh et al., 2019) نیز مشاهده شده است. گیاهان زراعی می‌توانند یک سیستم آنتی‌اکسیداتیو برای کاهش تنش اکسیداتیو القا شده به وسیله تجمع گونه‌های فعال اکسیژن

گیاه کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa* Wild متعلق به خانواده تاج خروس (*Amaranthaceae*) می‌باشد. این گیاه ارزش غذایی بالایی داشته و به تنش‌های غیرزنده از جمله خشکی و شوری تحمل نشان می‌دهد، از این رو بهترین گیاه جایگزین غلات می‌تواند در نظر گرفته شود (Prager et al., 2018). خاستگاه آن آمریکای جنوبی می‌باشد و به مدت ۷۰۰۰ سال است که در آن‌جا کشت می‌شود. خواص مغذی زیادی مانند محتوای بالای پروتئین (۸ تا ۲۲ درصد) در دانه دارد که بیشتر از غلات مانند جو، برنج و گندم است، بنابراین برای مصرف انسان و خوراک حیوانات مناسب می‌باشد (Turcios et al., 2021).

تنش خشکی به عنوان تنش محیطی مهم شناخته شده است که محدودیت‌های جدی برای تولید محصول در سراسر

رشدی در گیاه شده است (Ariel *et al.*, 2021).
 با توجه به این که بخش زیادی از ایران جزء مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود و تنش خشکی منجر به کاهش عملکرد گیاهان می گردد، بررسی تأثیر کودها بر روی افزایش عملکرد و مکانیسم های فیزیولوژیکی گیاهان ضروری است. گیاه کینوا تا حدودی مقاوم به خشکی بوده و استان کرمان نیز جزء مناطق خشک محسوب می شود؛ لذا کشت گیاهان مقاوم به خشکی و راهکارهایی جهت افزایش مقاومت به خشکی و بهبود صفات زراعی و فیزیولوژی در این گیاه ضروری می باشد. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقی نیز در این زمینه بر روی گیاه کینوا در شرایط آب و هوایی منطقه کرمان انجام نشده است، مطالعه حاضر برای بررسی تأثیر کود سولفات پتاسیم بر عملکرد دانه و برخی صفات فیزیولوژیکی گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف آبیاری انجام شد.

مواد و روش ها

این آزمایش در ایستگاه اداره کل مرکز تحقیقات و کشاورزی و منابع طبیعی کرمان واقع در ۲۲ کیلومتری جنوب شهر کرمان با موقعیت جغرافیایی ۵۷ درجه، ۴ دقیقه و ۵۵ طول شرقی و ۳۰ درجه، ۱۷ دقیقه و ۲۱ ثانیه عرض شمالی و ارتفاع ۱۸۳۰ متر از سطح دریا اجرا شد. این منطقه دارای آب و هوای خشک و نیمه معتدل بوده و متوسط بارندگی سالیانه آن در حدود ۱۵۰ میلی متر در سال های پرباران می باشد. کمینه و بیشینه متوسط دمای سالیانه آن به ترتیب تا حدود ۱۴- و ۴۰+ درجه سانتی گراد می باشد. بافت خاکی این ناحیه شنی لومی و pH خاک نیز معادل ۷/۷ است (جدول ۱).

آزمایش به صورت طرح کرت های خرد شده در قالب بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در ۱۸ مرداد انجام شد. فاکتور اصلی شامل سه سطح تیمار آبیاری شامل: شرایط تنش ملایم (آبیاری تا مرحله خمیری نرم)، تنش شدید (آبیاری تا مرحله شروع گل دهی) و شرایط غیرتنش (آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل یا شاهد) و فاکتور فرعی شامل دو سطح کود سولفات پتاسیم (۸ کیلوگرم در هزار متر مربع و عدم کاربرد) بود. اعمال تیمارهای کودی زمان شروع گل دهی با فاصله سه روز در مجاورت پای بوته روی خاک انجام گرفت. آبیاری قبل از کاشت و بعد از سبز شدن

تحت شرایط خشکی فعال نمایند. این سیستم ممکن است از آنزیم های آنتی اکسیدانت مهم مانند سوپر اکسید دیسمتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوکانیون ردوکتاز و آنتی اکسیدانت هایی مانند گلوکانیون و آسکوربات برای کاهش تنش اکسیداتیو القا شده به وسیله خشکی استفاده کند (Fahad *et al.*, 2017). با بررسی گیاه کینوا تحت شرایط تنش خشکی گزارش شده است که محتوای رنگیزه فتوسنتزی تحت تنش خشکی کاهش نشان داد، در حالی که فعالیت آنزیم های کاتالاز، سوپر اکسید دیسمتاز و آسکوربات پراکسیداز افزایش داشت (Gholami *et al.*, 2021). در مطالعه دیگری افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان تحت شرایط تنش خشکی در گیاه کنگر فرنگی مشاهده شد (Nouraei *et al.*, 2018). کمبود آب باعث کاهش پارامترهای رشدی گیاه کینوا، رنگدانه های فتوسنتزی و محتوای فنل و فلاونوئید شده اما با کاربرد تیمارهای ترهالوز در شرایط تنش افزایش قابل توجهی در عملکرد، محتوای فنل کل، فلاونوئیدها و فعالیت های آنتی اکسیدانی دانه های این گیاه مشاهده شده بود (Elewa *et al.*, 2017).

عناصر معدنی برای رشد و نمو گیاه حیاتی هستند و به عنوان یک فاکتور ضروری در اثر متقابل گیاه با محیط می باشند. این مواد بر پاسخ گیاه به محیط تأثیر می گذارند و آن ها را در برابر شرایط نامطلوب متحمل می کنند. پتاسیم یک کاتیون معدنی می باشد که برای فرآیندهای مختلف بیوفیزیکی و بیوشیمیایی مانند جوانه زنی بذر، حفظ وضعیت آب، فتوسنتز، فعال سازی آنزیم، سنتز پروتئین و سازگاری با شرایط تنش زا در گیاهان ضروری است. کمبود آن می تواند این فعالیت ها را مختل کند و رشد و نمو گیاهان را کاهش دهد. بنابراین پتاسیم برای تولید محصولات مهم است و می تواند یک عامل محدود کننده برای تولید محصولات تحت شرایط محیطی خاص مانند شوری و کم آبی باشد (Patel *et al.*, 2022).

گزارش شده است که پتاسیم نقش مهمی در فعالیت های مختلف آنزیمی، فتوسنتز، سنتز پروتئین، تنظیم اسمزی، انتقال انرژی، حرکت روزه ها و تحمل به تنش بازی می کند. بنابراین برای رشد گیاه ضروری است (Saifullah *et al.*, 2002). تحقیقات گذشته نشان داده است که کاربرد سولفات پتاسیم در گیاه کینوا تحت تیمار شوری ملایم باعث بهبود پارامترهای

تعیین گردید. به دلیل بیماری بوته‌میری قبل از کاشت، بذور با قارچ‌کش ضدعفونی شدند. عملیات کاشت در تاریخ ۱۵ مرداد ماه و در عمق ۱ سانتی‌متری با دست انجام گردید. مبارزه با علف‌های هرز نیز به صورت دستی صورت گرفت، چون در هفته اول کشت که رشد گیاه کینوا به کندی صورت می‌گیرد، مبارزه با علف‌های هرز ضروری است. عملیات برداشت پس از زرد شدن بوته‌ها و رسیدگی فیزیولوژیک در تاریخ ۲۵ آبان‌ماه به صورت دستی انجام و عملکرد دانه در هکتار (تن در هکتار) برای هر واحد آزمایشی محاسبه گردید.

هفته‌ای یک‌بار تا شروع مرحله گل‌دهی برای شرایط تنش شدید انجام شد. در شرایط تنش ملایم آبیاری تا مرحله خمیری نرم ادامه داشته و سپس قطع شد. برای شرایط نرمال نیز آبیاری تا رسیدگی فیزیولوژیک ادامه داشت.

عرض و طول کرت‌ها ۲/۴ در ۳ متر، فاصله بین کرت‌ها یک متر و فاصله بین بلوک‌ها سه متر و هر کرت فرعی شامل ۴ ردیف کاشت بود. فاصله بین ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها در هر خط کاشت ۱۰ سانتی‌متر بود. برای کاشت ابتدا خاک مزرعه تسطیح و شخم به عمق ۳۰ سانتی‌متر با گاوآهن قلمی انجام شد. میزان کود مصرفی نیز بسته به آزمایش خاک

جدول ۱- نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه (عمق ۰-۶۰ سانتی‌متر)

Table 1- The results of physical and chemical properties of farm soil (0-60 cm depth)

مشخصات خاک Soil characteristics	نتایج تجزیه خاک Results of soil analysis	
	2020	2021
بافت خاک soil Pattern	لومی شنی Sandy Loam	لومی شنی Sandy Loam
شن Sand (%)	69	71
رس (درصد) Clay (%)	13	12
سیلت (درصد) Silt (%)	18	17
واکنش خاک pH	7.7	7.9
هدایت الکتریکی EC(dS.m ⁻¹)	1.98	1.91

میلی‌گرم در گرم وزن تر نمونه به ترتیب با استفاده از فرمول‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به شرح زیر به دست آمد (Lichtenthaler and Wellburn, 1985).

در این روابط A میزان جذب در طول موج مورد نظر، V حجم نهایی استون ۸۰ درصد برحسب میلی‌لیتر و W اندازه برگ برحسب گرم می‌باشد.

$$a \text{ کلروفیل} = [(12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645})] \times V / 1000 \times W \quad (1)$$

$$b \text{ کلروفیل} = [(22.9 \times A_{645}) - (4.69 \times A_{663})] \times V / 1000 \times W \quad (2)$$

$$\text{کاروتنوئید} = \{ [1000(A_{470}) - 1.8(chla) - 85.02(chlb)] / 198 \} \times V / 1000 \times W \quad (3)$$

اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک

محتوای کلروفیل a و b و کاروتنوئیدها: مقدار ۰/۵ گرم از نمونه‌ها با استفاده از نیتروژن مایع پودر شدند. سپس ۲۰ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد به نمونه اضافه و با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردیدند. پس از آن مقدار جذب در طول موج‌های ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر قرلثت گردید. مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها بر حسب

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

فعالیت آنزیم کاتالاز: به منظور استخراج عصاره آنزیمی، ۲۰۰ میلی‌گرم بافت سبزی برگ با ۴ میلی‌لیتر بافر استخراج فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار با pH=7 در هاون چینی ساییده شده و پس از عبور از کاغذ صافی، با سرعت ۱۶ هزار دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ انجام شد. سپس فاز رویی جهت سنجش میزان فعالیت آنزیمی مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیم با ۲/۸ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7) و ۳۰۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن مخلوط شده و سپس با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر به مدت ۲ دقیقه قرائت شد. میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از ضریب خاموشی $39/4 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ و از تقسیم فعالیت حجمی کاتالاز بر میزان پروتئین عصاره محاسبه شد (Beers and Sizer, 1952).

فعالیت آنزیم پراکسیداز: ۵۰ میکرولیتر از عصاره آنزیم با ۲/۸ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۱۰۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن و ۱۰۰ میکرولیتر گلیکول ۱۸ میلی‌مولار مخلوط گردید. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر به مدت ۲ دقیقه در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. میزان فعالیت این آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی پراکسیداز $26/6 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ به دست آمد و بر اساس واحد در میلی‌گرم پروتئین گزارش شد (Fielding and Hall, 1978).

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز: ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیم با ۲/۸ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۳۰۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن و آسکوربات ۵ میلی‌مولار مخلوط شد. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۹۰ نانومتر قرائت شد. ضریب خاموشی آسکوربات پراکسیداز $2/8 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$ می‌باشد و یک واحد از فعالیت آن بیانگر میزان آنزیمی است که برای اکسید کردن یک میکرومول آسکوربات در یک دقیقه نیاز است (Yoshimura et al., 2000).

فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز: برای این منظور تعدادی لوله آزمایش در حمام آب گرم با ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس به هر کدام ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات

پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7) و ۲۰ میکرولیتر پیروگالل ۰/۰۲ مولار اضافه شد تا دمای لوله‌ها به ۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید. سپس به هر لوله ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه گردید. نمونه‌ها در طول موج ۴۲۰ نانومتر به مدت ۴ دقیقه قرائت شدند. مقدار فعالیت آنزیم بر اساس تغییرات جذب در طول موج ۴۲۰ نانومتر در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین گزارش شد (Janovitz-Klapp et al., 1990).

نشست یونی: ۰/۵ گرم برگ از هر نمونه داخل لوله‌های آزمایشی ریخته شدند و ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر به آن‌ها اضافه گردید. سپس به مدت ۲۴ ساعت در مکان تاریک نگهداری شدند. پس از این مدت، میزان هدایت الکتریکی اولیه (LT) آن‌ها به وسیله دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. بعد از آن نمونه‌ها در حمام آب گرم در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفتند و بعد از سرد شدن میزان هدایت الکتریکی آن‌ها (LO) اندازه‌گیری شد و درصد نشست یونی طبق فرمول $100 * (LT/LO)$ محاسبه گردید (Lutts et al., 1995).

محتوای مالون دی آلدهید: ۰/۲ گرم برگ با ۲ میلی‌لیتر تری کلرو استیک اسید ۰/۱ درصد (TCA) سائیده شد. عصاره به دست آمده به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. به ۵۰۰ میکرولیتر از محلول رویی حاصل از سانتریفیوژ، ۱ میلی‌لیتر TCA ۲۰ درصد حاوی ۰/۵ درصد تیوباربتوریک اسید (TBA) اضافه گردید. مخلوط حاصل در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد و بلافاصله در یخ سرد شد و دوباره مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. جذب این محلول در طول موج ۵۳۲ نانومتر قرائت شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری برحسب نانومول بر گرم وزن تر گزارش شدند (Heath and Paker, 1969).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از روش کولموگراف اسمیرنوف انجام شد و پس از تایید نرمال بودن داده‌ها، خطاها نیز از نظر نرمال بودن بررسی شدند. سپس تجزیه واریانس کلیه صفات و آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح پنج درصد با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک در جدول ۲ آورده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتور تیمار آبیاری و سولفات پتاسیم بر روی کلیه صفات بجز میزان کاروتنوئید تأثیر معنی داری داشتند که بیانگر تفاوت واکنش این صفات به تیمارهای آبیاری مختلف و سولفات پتاسیم است. اثر متقابل دو فاکتور برای کلیه صفات به غیر از محتوای مالون دی آلدئید معنی دار نبود که نشان دهنده این است که فاکتور سولفات پتاسیم در تیمارهای آبیاری مختلف به صورت یکسان عمل کرده است.

نتایج مقایسه میانگین فاکتور تیمار آبیاری برای عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک در جدول ۳ نشان داده شده است. عملکرد دانه و مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی متناسب با افزایش شدت تنش آبی کاهش نشان دادند، به طوری که کمترین مقادیر آن‌ها در شرایط تنش شدید (آبیاری تا شروع مرحله گل‌دهی) و بیشترین آن‌ها در شرایط نرمال (آبیاری تا رسیدگی کامل) به دست آمد. عملکرد دانه ۱۸/۷ و ۴۰/۸ درصد به ترتیب در شرایط تنش ملایم (آبیاری تا مرحله خمیری نرم) و تنش شدید (آبیاری تا مرحله شروع گل‌دهی) نسبت به شرایط غیرتنش (آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل یا شاهد) کاهش داشت. این نتایج نشان می‌دهد که تنش خشکی اثر زیان‌آوری بر روی عملکرد دانه داشته است.

مطابق با نتایج این تحقیق کاهش پارامترهای رشدی، عملکرد دانه و مقادیر رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش خشکی در گیاه کینوا قبلاً نیز گزارش شده است. آن‌ها هم‌چنین بیان کردند که کاهش عملکرد دانه می‌تواند به سبب کاهش انتقال مواد غذایی در دوره‌های رسیدگی دانه و پرشدن آن‌ها باشد (El-Shamy et al., 2022). کاهش عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی در گیاه گلزا (Mirzaei et al., 2013) و در گیاه کنجد (Ghotbzadeh Kermani et al., 2019) نیز مشاهده شده است.

آسیب به رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش کم‌آبی در گیاهان مختلف مانند لوبیا چشم بلبلی (Merwad et al., 2018) و مریم‌گلی (Cacer et al., 2018) گزارش شده است. به نظر می‌رسد دلیل کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی، افزایش تخریب این رنگدانه‌ها یا کاهش تولید آن‌ها و

نیز اختلال در فعالیت آنزیم‌های مسئول سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی باشد. هم‌چنین ممکن است به سبب کاهش جریان نیتروژن به بافت‌ها و تغییرات در فعالیت آنزیم‌هایی مانند نیترات ردوکتاز باشد (Han and Lee, 2005).

در تحقیق حاضر مقایسه میانگین برای فاکتور کود سولفات پتاسیم نشان داد که کاربرد این کود منجر به افزایش عملکرد دانه شد (جدول ۴). عملکرد دانه در هر سه تیمار آبیاری به طور میانگین ۲۵/۸ درصد در نتیجه کاربرد سولفات پتاسیم نسبت به عدم کاربرد آن افزایش نشان داد که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب این کود بر روی عملکرد دانه کینوا می‌باشد. عنصر پتاسیم نقش کلیدی در افزایش کارایی مصرف آب، تقسیم سلولی و سنتز هیدرو کربن‌ها و انتقال سریع آن‌ها به دانه عمل می‌کند و در نتیجه منجر به افزایش وزن دانه و عملکرد آن می‌شود (Daneshian et al., 2002). گزارش شده است که کاربرد سولفات پتاسیم عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک گیاه سورگوم را از طریق بهبود شرایط رشدی افزایش داده است (Heidari and Asgharipour, 2011).

مقادیر رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئیدها) نیز با کاربرد سولفات پتاسیم در این تحقیق افزایش نشان داد (جدول ۴). افزایش فعالیت فتوسنتزی ناشی از افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌ها می‌تواند به دلیل نقش پتاسیم در سنتز رنگدانه‌های پیش‌ساز کلروفیل باشد. محتوای بیشتر کلروفیل در برگ‌ها سبب افزایش تبدیل انرژی نورانی به انرژی شیمیایی به شکل ATP و NADPH در کلروپلاست‌ها می‌شود (Kumar and Kumar, 2008). افزایش کلروفیل در نتیجه کاربرد سولفات پتاسیم در گیاه کلزا مشابه با نتایج این تحقیق مشاهده شده بود (Farahani et al., 2020).

نشت یونی به عنوان شاخصی برای تخمین میزان تحمل به تنش خشکی شناخته شده است. با توجه به این که میزان نشت یونی با نفوذپذیری غشا مرتبط است، این ویژگی نشان‌دهنده آسیب به غشاها یا به عبارت دیگر شاخص تحمل به تنش است. مشخص شده است که این فاکتور به طور منفی تحت تأثیر تنش خشکی به سبب آسیب مکانیسم کلروفیل، تخریب سیستم فتوسنتزی، عدم جذب آب و اختلال در مواد غذایی خاک و انتقال آن‌ها به اندام‌های مختلف گیاه قرار گرفته است (Osman et al., 2021). در تحقیق حاضر نیز مقادیر نشت

یونی متناسب با افزایش شدت تنش خشکی افزایش داشت.

جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف آبیاری و سولفات پتاسیم

Table 2- Analysis of variance of seed yield and physiological traits of quinoa plant under different irrigation treatment and potassium sulphate

منابع S.O.V	درجه آزادی d.f.	عملکرد دانه Seed yield	آنزیم کاتالاز Catalase	آنزیم آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	آنزیم پراکسیداز Peroxidase	آنزیم پلی فنل اکسیداز Poly phenol oxidase
بلوک Block	2	0.010 ^{ns}	0.059*	0.024 ^{ns}	0.010 ^{ns}	0.004 ^{ns}
تیمار آبیاری Irrigation treatment	2	1.338**	1.18**	2.81**	2.89**	1.40**
خطای کرت اصلی Main plot error	4	0.012	0.010	0.031	0.015	0.003
سولفات پتاسیم Potassium Sulphate	1	1.345**	0.866**	1.19**	0.544**	0.025*
تیمار آبیاری × سولفات پتاسیم Irrigation treatment × Potassium Sulphate	2	0.021 ^{ns}	0.004 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.020 ^{ns}	0.002 ^{ns}
خطای کرت فرعی Sob plot error	6	0.013	0.010	0.013	0.014	0.003
ضریب تغییرات CV(%)		6.195	5.658	4.546	7.073	4.172

ns: غیر معنی دار، * و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, non-significant, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا تحت تیمارهای مختلف آبیاری و سولفات پتاسیم

Table 2- Analysis of variance of seed yield and physiological traits of quinoa plant under different irrigation treatment and potassium sulphate (Continued)

منابع S.O.V	درجه آزادی d.f.	کلروفیل a Chl-a	کلروفیل b Chl-b	کاروتنوئیدها Carotenoids	نشست یونی Electrolyte leakage	مالون دی آلدهید MDA
بلوک Block	2	0.005 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.011 ^{ns}	0.483 ^{ns}	0.00009 ^{ns}
تیمار آبیاری Irrigation treatment	2	1.642**	0.101**	0.011 ^{ns}	455.5**	4.42**
خطای کرت اصلی Main plot error	4	0.003	0.00007	0.013	1.03	0.0003
سولفات پتاسیم Potassium Sulphate	1	1.483**	1.868**	0.610**	273.1**	0.696**
تیمار آبیاری × سولفات پتاسیم Irrigation treatment × Potassium Sulphate	2	0.017 ^{ns}	0.00004 ^{ns}	0.026 ^{ns}	0.452 ^{ns}	0.005**
خطای کرت فرعی Sob plot error	6	0.026	0.0008	0.070	0.796	0.0002
ضریب تغییرات CV (%)		3.192	0.708	7.941	2.138	0.596

ns: غیر معنی دار، * و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

ns, non-significant, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$

در شرایط تنش شدید (آبیاری تا شروع مرحله گل دهی) ۳۰/۹ درصد و شرایط تنش ملایم (آبیاری تا مرحله خمیری

در شرایط تنش شدید (آبیاری تا شروع مرحله گل دهی)

تنش آبی باشد (Lata *et al.*, 2011). در این تحقیق، تنش خشکی به طور معنی داری میزان مالون دی آلدئید را افزایش داد که نشان دهنده آسیب اکسیداتیو گیاه در شرایط تنش کم آبی می باشد (جدول ۵). افزایش مالون دی آلدئید در گیاه کینوا قبلاً نیز گزارش شده است. بطوری که این محققین بیان کردند که افزایش محتوای مالون دی آلدئید در شرایط تنش خشکی منجر به افزایش پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلول و از بین رفتن پایداری غشای سلولی شده است که نتیجه آن تأثیر منفی بر عملکرد گیاه بود (Lin and Chao, 2021).

نرم) ۵/۵۶ درصد نسبت به شرایط غیرتنش افزایش مشاهده شد، که نشان دهنده آسیب به غشا می باشد و به نظر می رسد که یکی از دلایل کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش در مطالعه حاضر باشد. افزایش نشت یونی در گیاه کینوا قبلاً نیز مشاهده شده است (El-Shamy *et al.*, 2022).

گونه های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش کمبود آب می تواند منجر به پراکسیداسیون اسیدهای چرب غشای سلولی شده و سبب تولید مالون دی آلدئید گردد. در نتیجه میزان مالون دی آلدئید می تواند معیار مهمی از حساسیت به

جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 3- Mean comparison for seed yield and physiological traits in different irrigation treatments

تیمار آبیاری	عملکرد دانه Seed yield (ton/ha)	آنزیم کاتالاز Catalase	آنزیم آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	آنزیم پراکسیداز Peroxidase	آنزیم پلی فنل اکسیداز Poly phenol oxidase
Irrigation treatments			(unit/mg protein)		
آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل Irrigation to the full maturity stage	2.309 ^a	1.263 ^c	1.855 ^c	1.025 ^c	0.894 ^c
آبیاری تا مرحله شروع گلدهی Irrigation to the beginning of the flowering stage	1.366 ^c	1.799 ^b	3.218 ^a	2.407 ^a	1.822 ^a
آبیاری تا مرحله خمیری نرم irrigation to the dough development stage	1.877 ^b	2.143 ^a	2.438 ^b	1.609 ^b	1.125 ^b

برای هر صفت میانگین هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with a same letter are not significantly different at 5% level of probability according to the LSD test.

ادامه جدول ۳- مقایسه میانگین عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 3- Mean comparison for seed yield and physiological traits in different irrigation treatments (Continued)

تیمار آبیاری	کلروفیل a Chl-a	کلروفیل b Chl-b	کاروتنوئیدها Carotenoids	نشت یونی Electrolyte leakage	مالون دی آلدئید MDA
Irrigation treatments		(mg/g FW)		(%)	(nanomol/g FW)
آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل Irrigation to the full maturity stage	2.529 ^a	1.839 ^a	1.409 ^a	35.7 ^c	1.332 ^c
آبیاری تا شروع مرحله گلدهی Irrigation to the beginning of the flowering stage	1.492 ^c	1.582 ^c	1.327 ^a	51.7 ^a	3.013 ^a
آبیاری تا مرحله خمیری نرم Irrigation to the dough development stage	2.134 ^b	1.746 ^b	1.350 ^a	37.8 ^b	1.869 ^b

برای هر صفت میانگین هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with a same letter are not significantly different at 5% level of probability according to the LSD test.

جدول ۴- مقایسه میانگین عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا برای تیمار سولفات پتاسیم

Table 4- Mean comparison for seed yield and physiological traits for potassium sulfate treatment

سولفات پتاسیم Potassium Sulfate	عملکرد دانه Seed yield (ton/ha)	آنزیم کاتالاز Catalase	آنزیم آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	آنزیم پراکسیداز Peroxidase	آنزیم پلی فنل اکسیداز Poly phenol oxidase
عدم کاربرد Non-application	1.577 ^b	1.515 ^b	2.246 ^b	1.506 ^b	1.243 ^b
کاربرد Application	2.124 ^a	1.954 ^a	2.761 ^a	1.854 ^a	1.318 ^a

برای هر صفت میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with a same letter are not significantly different at 5% level of probability according to the LSD test.

ادامه جدول ۴- میانگین عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا برای تیمار سولفات پتاسیم

Table 4- Mean comparison for seed yield and physiological traits for potassium sulfate treatment (Continued)

سولفات پتاسیم Potassium Sulfate	کلروفیل a Chl-a	کلروفیل b Chl-b (%)	کاروتنوئیدها Carotenoids (mg/g FW)	نشت یونی Electrolyte leakage	مالون دی آلدئید MDA (nanomol/g FW)
عدم کاربرد Non-application	1.765 ^b	1.400 ^b	1.178 ^b	45.6 ^a	2.134 ^a
کاربرد Application	2.339 ^a	2.044 ^a	1.546 ^a	37.8 ^b	1.875 ^b

برای هر صفت میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with a same letter are not significantly different at 5% level of probability according to the LSD test.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل تیمار آبیاری و سولفات پتاسیم بر محتوای مالون دی آلدئید در گیاه کینوا

Table 5- Mean comparison of irrigation treatment and potassium sulfate interaction on MDA in quinoa plant

تیمار آبیاری Irrigation treatments	سولفات پتاسیم Potassium sulfate	مالون دی آلدئید MDA (nanomol/g FW)
آبیاری تا مرحله رسیدگی کامل Irrigation to the full maturity stage	عدم کاربرد Non-application	1.551 ^e
	کاربرد application	1.113 ^f
آبیاری تا شروع مرحله گلدهی Irrigation to the beginning of the flowering stage	عدم کاربرد Non-application	3.177 ^a
	کاربرد application	2.848 ^b
آبیاری تا مرحله خمیری نرم irrigation to the dough development stage	عدم کاربرد Non-application	2.046 ^c
	کاربرد application	1.662 ^d

میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Means with a same letter are not significantly different at 5% level of probability according to the LSD test.

پتاسیم سبب کاهش محتوای مالون دی آلدئید در هر سه تیمار آبیاری (آبیاری تا رسیدگی کامل، آبیاری تا شروع مرحله گلدهی و آبیاری تا مرحله خمیری نرم) به ترتیب به میزان ۲۸/۲، ۱۰/۴ و ۱۸/۸ درصد گردید (جدول ۵). این نتایج بیانگر این است که سولفات پتاسیم سبب بهبود پایداری غشای سلولی

کاربرد سولفات پتاسیم در مطالعه حاضر منجر به کاهش محتوای مالون دی آلدئید و نشت یونی شد. نشت یونی و محتوای مالون دی آلدئید در هر سه تیمار آبیاری به طور متوسط به ترتیب ۱۷/۱ و ۱۲/۳ درصد در مقایسه با عدم کاربرد سولفات پتاسیم کاهش نشان دادند. هم‌چنین کاربرد سولفات

اکسیداز در هر سه تیمار آبیاری به طور میانگین به ترتیب ۲۲/۵، ۱۸/۷، ۱۸/۸ و ۵/۶ درصد نسبت به عدم کاربرد آن افزایش داشتند. این افزایش نشان می‌دهد که سولفات پتاسیم سبب بهبود سیستم دفاعی آنزیمی در گیاه کینوا بر علیه تنش اکسیداتیو شده است و در نتیجه آن را از آسیب گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده محافظت کرده و سبب افزایش عملکرد دانه شده است. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در نتیجه کاربرد سولفات پتاسیم در سایر گیاهانی مانند گندم نیز گزارش شد (Lotfi et al., 2022).

نتیجه‌گیری کلی

عملکرد دانه و مقادیر رنگیزه‌های فتوسنتزی متناسب با افزایش تنش خشکی کاهش و نشت یونی و محتوای مالون دی‌آلدهید افزایش داشتند که نشان‌دهنده اثرات زیان‌آور این تنش بر روی پارامترهای رشدی، دستگاه فتوسنتزی و پایداری غشای سلولی بود. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در شرایط تنش افزایش نشان دادند که بیانگر پاسخ‌های دفاعی آنزیمی به تنش اکسیداتیو است. کاربرد سولفات پتاسیم منجر به بهبود عملکرد دانه و صفات فیزیولوژیکی در هر دو محیط نرمال و تنش خشکی به طور یکسان شد. بنابراین از آن‌جا که تنش خشکی سبب آسیب به فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه کینوا و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه آن می‌شود، استفاده از کود سولفات پتاسیم برای جبران اثرات زیان‌آور تنش خشکی می‌تواند مفید باشد.

شده است. گزارش شده است که کاربرد سولفات پتاسیم به طور معنی‌داری نشت یونی را تحت شرایط تنش خشکی در گیاه کاکائو کاهش داده است (Anokey et al., 2021). کاهش مالون دی‌آلدهید در گیاه گندم نیز با کاربرد پتاسیم مشاهده شده بود (Lotfi et al., 2022).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و پلی‌فنول اکسیداز متناسب با افزایش شدت تنش آبی در تحقیق حاضر افزایش داشتند، به طوری که کمترین مقادیر آن‌ها در گیاهان شاهد و بیشترین مقادیر آن‌ها در شرایط تنش آبی شدید بود (جدول ۳)، که نشان‌دهنده واکنش گیاهان به تنش اکسیداتیو از طریق سیستم دفاعی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌باشد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌تواند گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش مانند پراکسید هیدروژن را که برای گیاهان زیان‌آور است به ترکیبات غیرسمی مانند آب و اکسیژن تبدیل کند. بنابراین گیاهان را از اثرات مخرب آن‌ها بر غشای سلولی و ماکرومولکول‌ها محافظت می‌کند (Abbas et al., 2021). مطابق با نتایج این تحقیق در سایر مطالعات نیز افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شامل کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه کینوا تحت شرایط تنش خشکی مشاهده شده بود (El-Shamy et al., 2022; Gholami et al., 2022).

در مطالعه حاضر کاربرد سولفات پتاسیم سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان شد (جدول ۴). فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و پلی‌فنل

References

- Abbas, G., Amjad, M., Saqib, M., Murtaza, B., Naeem, M.A., Shabbir, A. and Murtaza, G. 2021. Soil solidity is more detrimental than salinity for quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild): A multivariate comparison of physiological, biochemical and nutritional quality attributes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207: 59-73.
- Abdallah, M.M.S., El-Bassiouny, H.M.S. and Seeda, M.A.A. 2019. Potential role of kaolin or potassium sulfate as anti-transpirant on improving physiological, biochemical aspects and yield of wheat plants under different watering regimes. *Bulletin of the National Research Center*, 43(134): 1-12.
- Anokye, E., Lowor, S.T., Dogbatse, J.A. and Padi, F.K. 2021. Potassium application positively modulates physiological responses of cocoa seedlings to drought stress. *Agronomy*, 11(3): 1-19.

- Asgharipour, M.R. and Heidari, M.** 2011. Effect of potassium supply on drought resistance in sorghum: plant growth and macronutrient content. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 48: 197-204.
- Beers, G.R. and Sizer, I.W.** 1952. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. *Biological Chemistry*, 195(1): 133-140.
- Caser, M., Angiolillo, F., Chitarra, W., Lovisolo, C., Ruffoni, B., Pistelli, L. and Scariot, V.** 2018. Ecophysiological and phytochemical responses of *Salvia sinaloensis* Fern. to drought stress. *Plant Growth Regulation*, 84: 383-394.
- Daneshian, J., Majidi Hrvan, A. and Jonoubi, P.** 2002. The effect of drought stress and different amounts of potassium on quantitative and qualitative characteristics of soybean. *The Journal of Agricultural Science*, 8: 95-108.
- El-Shamy, M.A., Alshaal, T., Hussein, M.H., Rady, A.M.S., Hafez, E.M., Alsohim, A.S. and El-Moneim, D.A.** 2022. Quinoa response to application of phosphogypsum and plant growth-promoting Rhizobacteria under water stress associated with salt-affected soil. *Plants*, 11(7): 1-26.
- Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adlins, S., Saud, S. and et al.** 2017. Crop production under drought and heat stress. Plant response and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8: 11-21.
- Farahani, S., Shahsavari, N. and Mohammadi Arasteh, M.** 2020. Effect of potassium sulfate on the physiological characteristics of canola cultivars in late season drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 43(9): 1543-1555.
- Fielding, J.L. and Hall, J.** 1978. A biochemical and cytochemical study of peroxidase activity in root pea. *Journal of Experimental Botany*, 29: 981-989.
- Gholami, Sh., Amini Dehaghi, M., Rezazadeh, A. and Naji, A.M.** 2021. Seed germination and physiological responses of quinoa to selenium priming under drought stress. *Bragantia, Campinas*, 81: 1-16.
- Ghotbzadeh Kermani, S., Saeidi, Gh., Sabzalian, M.R. and Gianinetti, A.** 2019. Drought stress influenced sesamin and sesamol content and polyphenolic components in sesame (*Sesamum indicum* L.) populations with contrasting seed coat colors. *Food Chemistry*, 289: 360-368.
- Han, H.S. and Lee, K.D.** 2005. Plant growth promoting rhizobacteria effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth on lettuce under soil salinity. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 1: 210-215.
- Heath, R.L. and Packer, L.** 1969. Photoperoxidation in isolated chloroplast I kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry*, 125: 189-198.
- Janovitz-Klapp, A.H., Richard, F.C., Goupy, P.M. and Nicolas, J.J.** 1990. Inhibition studies on apple polyphenol oxidase. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 38: 926-931.
- Kumar, A.R. and Kumar, M.** 2008. Studies on the efficacy of sulfate of potash on physiological, yield and quality parameters of Banana cv. Robusta (Cavendish-AAA). *EurAsian Journal of BioSciences*, 2: 102-109.
- Latta, C., Jha, S., Sreenivasulu, N. and Prasad, M.** 2011. Differential responses to dehydration- induced

- oxidative stress in core set of foxtail millet cultivars. *Protoplasms*, 248: 817-828.
- Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R.** 1985. Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11: 591-592.
- Lin, P.H. and Chao, Y.Y.** 2021. Different drought-tolerant mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild) and djulis (*Chenopodium formosanum* Koidz.) based on physiological analysis. *Plants*, 10(11): 1-15.
- Lotfi, R., Abbasi, A., Kalaji, H.M., Eskandari, I., Sedghieh, V., Khorsandi, H., Sadeghian, N., Yadav, S. and Rastogi, A.** 2022. The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182: 45-54.
- Lutts, S., Kinet, J.M. and Bouharmont, J.** 1995. Changes in plant response to NaCl during development of rice (*Oryza sativa* L.) varieties differing in salinity resistance. *Journal of Experimental Botany*, 46: 1843-1852.
- Merwad, A.M.A., Desoky, E.S.M. and Rady, M.M.** 2018. Response of water deficit-stressed *Vigna unguiculata* performances to silicon, proline or methionine foliar application. *Science Horticulturae*, 228: 132-144.
- Mirjahanmardi, H. and Ehsanzadeh, P.** 2016. Iron supplement ameliorates drought-induced alterations in physiological attributes of fennel (*Foeniculum vulgare*). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 106: 61-76.
- Mirzaei, A., Naseri, R., Moghadam, A. and Esmailpour-Jahromy, M.** 2013. The effects of drought stress on seed yield and some agronomy traits of canola cultivars different growth stages. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Science*, 2: 115-121.
- Nouraei, S., Rhimmalek, M. and Saeidi, Gh.** 2018. Variation in polyphenolic composition, antioxidants and physiological characteristics of globe artichoke (*Cynara cardunculus* var. scolymus Hayek L.) as effected by drought stress. *Science Horticulture*, 233: 378-385.
- Osman, H., Gowayed, S., Elbagori, M., Omara, A., El-Monem, A., El-Razek, U.A. and Hafez, E.** 2021. Interactive impacts of beneficial microbes and Si-Zn nanocomposite on growth and productivity of soybean subjected to water deficit under salt-affected soil conditions. *Plants*, 10(7): 1-23.
- Patel, M., Fatnani, D. and Parida, A.K.** 2022. Potassium deficiency stress tolerance in peanut (*Arachis hypogaea*) through ion homeostasis, activation of antioxidant defense and metabolic dynamics: alleviatory role of silicon supplementation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182: 55-75.
- Prager, A., Munz, S., Nkebiwe, P. M., Mast, B. and Graeff-Honninger, S.** 2018. Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) cultivars grown under field conditions in Southwestern Germany. *Agronomy*, 8: 197-216.
- Suifullah, A., Ranjha, M., Yaseen, M. and Akhtar, M.F.** 2002. Response of wheat to potassium fertilization under field conditions. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 39: 269-272.
- Turcios, A.E., Papenbrock, J. and Trankner, M.** 2021. Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207: 618-630.
- Yoshimura, K., Yabute, Y., Ishikawa, T. and Shigeoka, S.** 2000. Expression of spinach ascorbate peroxidase isoenzymes in response to oxidative stresses. *Plant Physiology*, 123: 223-233.

The effect of drought stress and potassium sulfate on seed yield and physiological traits of quinoa plant

Seyyed Fatemeh Mousavi Sardou¹, Isa Khammari^{2*}, Seyyed Mohsen Mousavi Nick², Ali Akbar Maghsoudi³, Maryam Allahdou⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

² Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

⁴ Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran

*Corresponding Author: ikhammari@uoz.ac.ir

Received: 29 September 2022

Accepted: 8 January 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.356951.1277

Abstract

Introduction: The quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild) belongs to the *Amarranthaceae* family. This plant has a high nutritional value and shows tolerance to abiotic stresses such as drought and salinity. Drought stress is known as an important environmental stress that creates serious limitations for crop production all over the world. Drought stress may cause the production of reactive oxygen species in plants, which damages lipid and protein structures and causes the cell membrane to lose permeability and selectivity. Potassium is a mineral substance that is necessary for various biophysical and biochemical processes. It is important for the production of crops and can be a limiting factor for the production of crops under certain environmental conditions, such as salinity and drought. Quinoas somewhat resistant to drought, and Kerman province is considered one of the dry areas. Therefore, cultivation of drought-resistant plants and strategies to increase drought resistance and improve agricultural and physiological traits in this plant are necessary. Considering that no research has been done in this field on quinoa plants in the climatic conditions of the Kerman region, the present study was conducted to investigate the effect of potassium sulfate fertilizer on seed yield and some physiological traits of quinoa plants under different irrigation treatments.

Materials and Methods: The experiment of split plots based on randomized complete blocks design with three replications was conducted at the research farm of the Agriculture and Natural Resources Centre in Kerman province of Iran in the 2020–2021 crop year. The main factor included three levels of irrigation treatment (irrigation to the full maturity stage (control), irrigation to the beginning of the flowering stage, and irrigation to the dough development stage), and the secondary factor included two levels of potassium sulfate fertilizer, including its application and non-application. Physiological traits including the content of chlorophyll a and b and carotenoids, ion leakage, malondialdehyde content, and the activity of enzymes such as catalase, ascorbate peroxidase, peroxidase, and polyphenol oxidase were measured. After confirming the normality of the data, the errors were also checked for normality. Then a variance analysis of all traits and an LSD mean comparison test at the five percent level were performed with SAS software version 2.9.

Results and Discussion: The effect of irrigation factor and potassium sulfate on seed yield and all measured physiological traits (content of photosynthetic pigments, chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids), activity of antioxidant enzymes (catalase, peroxidase, ascorbate peroxidase, and polyphenol oxidase), electrolyte leakage, and malondialdehyde content) were significant. The highest seed yield (230.9 g/m²) was observed in control plants and the lowest (136.6 g/m²) in plants grown under irrigation conditions to the beginning of the flowering stage. Drought stress decreased the content of photosynthetic pigments and increased the activity of antioxidant enzymes, electrolyte leakage, and malondialdehyde content. The application of potassium sulfate caused an increase in the seed yield compared to its non-application in all three irrigation treatments by an average of 25.8%. Physiological traits also improved with the application of potassium sulfate.

Conclusion: The yield of seeds and the amounts of photosynthetic pigments decreased in proportion to the increase in drought stress, and the ion leakage and malondialdehyde content increased, which indicated the harmful effects of this stress on growth parameters, photosynthetic apparatus, and cell membrane stability. The activity of antioxidant enzymes increased under stress conditions, which indicates the enzymatic defense responses to oxidative stress. The application of potassium sulfate led to the improvement of seed yield and physiological traits in both normal and drought -stress environments. Due to the fact that drought stress affects the physiological traits and ultimately leads to a decrease in the seed yield of the quinoa plant, potassium sulfate fertilizer was used to compensate for its harmful effects.

Key words: Antioxidant enzymes, Potassium Fertilizer, Photosynthetic pigments, Water stress