

## Quantitative evaluation of some biochemical traits participation to drought resistance in quinoa

Shima Sepasi<sup>1</sup>, Manoochehr Gholipour<sup>\*2</sup>, Hamid Abbasdokht<sup>3</sup>, Mehdi Khorshidi<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student in Crop Ecology, Dept. of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [shima.sepasii@gmail.com](mailto:shima.sepasii@gmail.com)
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [manoochehr.gholipour@gmail.com](mailto:manoochehr.gholipour@gmail.com)
3. Associate Prof., Dept. of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [habbasdokht@yahoo.com](mailto:habbasdokht@yahoo.com)
4. Assistant Prof., Dept. of Biology, Faculty of Biology, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: [khoshidi@du.ac.ir](mailto:khoshidi@du.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Full Length Research Paper

**Article history:**  
Received: 12.04.2022  
Revised: 03.28.2023  
Accepted: 04.03.2023

**Keywords:**  
Antagonism,  
Optimization,  
Quinoa,  
Regression,  
Synergism

### ABSTRACT

**Background and Objectives:** Under oxidative stress conditions, the quantity of some biochemical traits, including antioxidants, increases in the plant. Now this question is raised that incremental change in these traits can always increase drought resistance (higher biomass) in drought-stressed conditions? In this regard, conflicting results have been published, which are mostly based on their correlation coefficient. The purpose of this study was a deeper contemplation into these complexities in quinoa; so, the nonlinear, synergistic, and antagonistic relationships of several biochemical traits with biomass were investigated, using multiple nonlinear regression based on stepwise selection. Finally, the resulting regression function was maximized (optimized).

**Materials and Methods:** The split-plot experiment based on a randomized complete block design was carried out in three replications and two locations (Damghan and Dibaj). Factors were deficit irrigation levels [control (Supplying 100% of the plant's water requirements), moderate deficit irrigation (70%), and severe deficit irrigation (40%)] in the main plots, and sodium nitrophenolate spraying levels [the control (spraying tap water on the plant), foliar spraying at the stem elongation stage and foliar spraying at the flowering stage] in the subplots. The data of biomass (dependent variable; Y or drought resistance) and several regressors (superoxide dismutase, anthocyanin, soluble sugars, proline, carotenoid, superoxide dismutase, ascorbate-peroxidase, and catalase; X or independent variables), obtained under severe deficit irrigation conditions, were used for the present analysis.

**Results:** The results of the regression analysis showed that the relation of carotenoid, catalase, anthocyanin, and ascorbate peroxidase with drought resistance was quadratic, however, the mentioned relationship was very different. Over low concentrations (activities), the effect of catalase, anthocyanin, and ascorbate peroxidase was statistically not significant (with increasing concentration, drought resistance showed no change), but over higher concentrations, their impact was decreasing; the effect of ascorbate peroxidase appeared to be increasing just over its higher concentrations. On the contrary, over both low and high concentrations, the effect of carotenoid was positive; the positive effect of higher carotenoid concentrations tended to be slightly stronger than that of low

---

concentrations. Proline and catalase had the highest effect on drought resistance when their increase was considered simultaneously (synergistic relationship). The effect of soluble sugars was negative; particularly, the simultaneous increase in soluble sugars and proline concentrations led to a sharp decrease in drought resistance (antagonistic relationship); hence, it seems that the simultaneous increase of these two traits should not be used for breeding purposes.

**Conclusion:** The results regarding optimization (maximization) of the regression function indicated that a combination of 600 Unit SOD.g<sup>-1</sup>FW superoxide dismutase, 8.58 μmol ascorbate min<sup>-1</sup>.mg<sup>-1</sup>FW ascorbate peroxidase, 2.28 μmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.min<sup>-1</sup>FW catalase, 6.65 mg.g<sup>-1</sup>FW soluble sugars, 2.15 mg.g<sup>-1</sup>FW anthocyanin, 6.79 mg.g<sup>-1</sup>FW proline, and 18.8 mg.g<sup>-1</sup>FW carotenoids could be led to an increase in biomass by 9% higher than the maximum observed value of biomass.

---

Cite this article: Sepasi, Shima, Gholipoor, Manoochehr, Abbasdokht, Hamid, Khorshidi, Mehdi. 2023. Quantitative evaluation of some biochemical traits participation to drought resistance in quinoa. *Journal of Plant Production Research*, 30 (3), 65-84.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2023.20657.2968

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

---

## ارزیابی کمی میزان مشارکت برخی صفات زیست‌شیمیایی گیاه کینوا در مقاومت به خشکی

شیما سپاسی<sup>۱</sup>، منوچهر قلی‌پور<sup>۲\*</sup>، حمید عباسدخت<sup>۳</sup>، مهدی خورشیدی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری اکولوژی کشاورزی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [shima.sepasii@gmail.com](mailto:shima.sepasii@gmail.com)
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [manouchehr.gholipoor@gmail.com](mailto:manouchehr.gholipoor@gmail.com)
۳. دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [habbasdokht@yahoo.com](mailto:habbasdokht@yahoo.com)
۴. استادیار گروه زیست‌شناسی، دانشکده زیست‌شناسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: [khorsmidi@du.ac.ir](mailto:khorsmidi@du.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله کامل علمی-پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۱/۰۹/۱۳</p> <p><b>تاریخ ویرایش:</b> ۱۴۰۲/۰۱/۰۸</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۲/۰۱/۱۴</p>	<p><b>سابقه و هدف:</b> در شرایط تنش اکسیداتیو، کمیت برخی صفات زیست‌شیمیایی از جمله آنتی‌اکسیدان‌ها در گیاه افزایش می‌یابد. اکنون این سؤال مطرح است که تغییر افزایشی در این صفات می‌تواند همواره باعث افزایش مقاومت به خشکی (زیست‌توده بیش‌تر) در شرایط واجد تنش خشکی شود؟ در این خصوص نتایج ضد و نقیضی منتشر شده است که تقریباً اکثراً مبتنی بر ضریب همبستگی آن‌ها می‌باشد. هدف از این مطالعه، تأملی عمیق‌تر از گذشته بر این پیچیدگی‌ها در کینوا بود؛ به طوری که با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندگانه مبتنی بر گزینش گام به گام، روابط غیرخطی، هم‌افزا (سینرژیزم) و هم‌گاه (آنتاگونیسم) چند صفت زیست‌شیمیایی با وزن زیست‌توده بررسی گردید و در انتها، تابع رگرسیونی حاصله به حداکثرسانی شد.</p>
<p><b>واژه‌های کلیدی:</b> آنتاگونیسم، بهینه‌سازی، رگرسیون، سینرژیزم، کینوا</p>	<p><b>مواد و روش‌ها:</b> آزمایشی به صورت اسپلیت‌پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو مکان (دامغان و دیباج) به اجرا درآمد. فاکتورها شامل سطوح کم‌آبایی (شاهد (آبایی به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، کم‌آبایی متوسط (۷۰ درصد)، و کم‌آبایی شدید (۴۰ درصد)) در کرت‌های اصلی، و محلول‌پاشی نیتروفنولات سدیم (شاهد (پاشش آب معمولی بر روی گیاه)، محلول‌پاشی در زمان ساقه‌روی و محلول‌پاشی به‌هنگام گلدهی) در کرت‌های فرعی بود. داده‌های مربوط به زیست‌توده (متغیر وابسته؛ Y یا مقاومت به خشکی) و چند رگرسور (سوپراکسید دیسموتاز، آنتوسیانین، فندهای محلول، پرولین، کاروتنوئید، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات‌پراکسیداز و کاتالاز؛ X یا متغیرهای مستقل) در شرایط کم‌آبایی شدید برای تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند.</p>

**یافته‌ها:** نتایج حاصل از تجزیه رگرسیون نشان داد که رابطه کاروتنوئید، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و آنتوسیانین با مقاومت به خشکی رابطه‌ای درجه دو بود، با این حال این رابطه، تفاوت زیادی داشت. به طوری که از لحاظ آماری، اثر مثبت کاتالاز، آنتوسیانین و آسکوربات پراکسیداز در غلظت (فعالیت) های کم معنی دار نبود (با افزایش غلظت، تغییری در مقاومت به خشکی ایجاد نشد) ولی اثر غلظت های بالاتر کاتالاز و آنتوسیانین اثری کاهنده، و اثر غلظت های بالاتر آسکوربات پراکسیداز به عنوان اثری افزایش دهنده شناخته شد. در مقابل، هم تأثیر غلظت های کم و هم تأثیر غلظت های بالاتر کاروتنوئید افزایش دهنده بود؛ به انضمام این که، اثر مثبت غلظت های بالاتر کاروتنوئید اندکی بیش تر از اثر غلظت های کم آن به دست آمد. پرولین و کاتالاز بالاترین تأثیر را بر مقاومت به خشکی به جای گذاشتند به شرطی که افزایش آن‌ها توأمان در نظر گرفته می شد (رابطه سینرژیست). اثر قندهای محلول، منفی به دست آمد؛ به ویژه این که افزایش توأمان قندهای محلول با پرولین منجر به کاهش شدید مقاومت به خشکی گردید (رابطه آنتاگونیست)؛ از این رو به نظر می رسد افزایش این دو نباید مد نظر اصلاح گران قرار بگیرد.

**نتیجه گیری:** نتایج بهینه سازی (به حدکثر رسانی) تابع رگرسیونی بیانگر آن بود که ترکیبی از  $600 \text{ Unit SOD.g}^{-1}\text{FW}$  سوپراکسید دیسموتاز،  $8/58 \mu\text{mol ascorbate min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{FW}$  آسکوربات پراکسیداز،  $2/28 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2.\text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{FW}$  کاتالاز،  $6/65 \text{ mg.g}^{-1}\text{FW}$  قندهای محلول،  $2/15 \text{ mg.g}^{-1}\text{FW}$  آنتوسیانین،  $6/79 \text{ mg.g}^{-1}\text{FW}$  پرولین و  $18/8 \text{ mg.g}^{-1}\text{FW}$  کاروتنوئید منجر به افزایش زیست توده به میزان ۹ درصد بالاتر از بیش ترین مقدار مشاهده شده زیست توده گردید.

استناد: سپاسی، شیمای، قلی پور، منوچهر، عباسدخت، حمید، خورشیدی، مهدی (۱۴۰۲). ارزیابی کمی میزان مشارکت برخی صفات زیست شیمیایی گیاه کینوا در مقاومت به خشکی. نشریه پژوهش های تولید گیاهی، ۳۰ (۳)، ۶۵-۸۴.

DOI: 10.22069/JOPP.2023.20657.2968



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### مقدمه

کینوا با نام علمی *Chenopodium quinoa Willd*. گیاهی یک‌ساله، هالوفیت، دولپه از خانواده *Amaranthaceae* و زیرخانواده *Chenopodiaceae* با مکانیزم فتوسنتزی  $C_3$  می‌باشد که به شرایط نامناسب خاک و اقلیم، نسبتاً متحمل شناخته می‌شود (۱). دانه آن در مقایسه با غلات دارای پروتئین و آمینو اسیدهای بیش‌تری بوده و حاوی لیزین (۸-۵ درصد) و متیونین است. پروتئین کینوا بیش‌تر از نوع آلبومین و گلوبولین می‌باشد. تعادل مناسب آمینو اسیدهای آن مشابه با آمینو اسیدهای ضروری موجود در شیر است. برگ‌های کینوا نیز دارای میزان بالایی از پروتئین، ویتامین‌ها، کلسیم، فسفر و آهن می‌باشد (۲). مزیت اصلی استفاده از بذر کینوا به عنوان یک مکمل غذایی در صنعت آرد، پاسخ‌گویی کینوا به تقاضای رو به رشد بین‌المللی برای محصولات فاقد گلوتن است. دانه‌های کینوا غنی از فیبرهای رژیمی و مواد مغذی (۳ درصد) و طیف وسیعی از ویتامین‌ها می‌باشد و به دلیل ارزش غذایی بالا، در نان، ماکارونی و غذای کودک استفاده می‌شود (۳). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی بالای دانه‌های کینوا به سبب وجود ترکیبات فنلی از جمله آلفاتوکوفرول (ویتامین E) است که مانع از اکسیداسیون اسیدهای چرب و پراکسیداسیون لیپیدها می‌گردند. کینوای خام و نپخته دارای ۱۳ درصد آب، ۶۴ درصد کربوهیدرات، ۱۴ درصد پروتئین و ۶ درصد چربی است و ۱۰۰ گرم کینوای پخته ۱۲۰ کالری دارد و منبع غنی منگنز و فسفر (به ترتیب ۳۰ و ۲۰ درصد نیاز روزانه) می‌باشد (۴).

کمبود آب یکی از تهدیدهای اصلی برای آینده کشاورزی و جمعیت در سراسر جهان از جمله ایران است. درک کامل از مکانیسم فرایندهای فیزیولوژیکی مرتبط با پاسخ گیاهان به تنش خشکی امری ضروری برای بهبود تحمل آن‌ها از طریق استراتژی‌های اصلاح

مولکولی به شمار می‌آید (۴). در گیاهان تحت تنش خشکی، میزان گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) از جمله پراکسید هیدروژن ( $H_2O_2$ )، رادیکال‌های سوپراکسید ( $O_2^-$ ) و هیدروکسیل (OH) افزایش می‌یابد که به آن تنش اکسیداتیو گویند. در غیاب هر گونه مکانیسم حفاظتی، ROS می‌تواند از طریق آسیب اکسیداتیو به لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک متابولیسم طبیعی سلول را مختل کرده، به غشاء سلول آسیب رساند، و در نهایت موجب مرگ سلولی گردد (۵).

برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی، سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی با کارایی بالا در گیاه وجود دارد که می‌تواند از گیاه در برابر رادیکال‌های آزاد محافظت نماید (۶). این سیستم دفاعی، شامل آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز، گایاکول پراکسیداز و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی شامل آسکوربات، توکوفرول، فلاونوئیدها، مانتیتول‌ها، آنتوسیانین، فلاونول و پلی‌فنل‌ها می‌باشد (۵). گزارش‌ها بیانگر افزایش چشمگیر محتوای پرولین در دو لاین تریپتیکاله تحت تنش خشکی می‌باشد (۷). غلظت پرولین و آمینو اسیدهای آزاد در کینوای روییده تحت شرایط تنش، افزایش نشان می‌دهد (۱). هینوجوسا و همکاران (۲۰۱۸) نیز در کینوای تحت تنش خشکی گزارش نموده که محتوای پرولین و قند کل افزایش نشان می‌دهد (۲). افزایش آمینو اسیدهایی چون پرولین تحت تنش کم‌آبی باعث تنظیم فشار اسمزی، کاهش هدررفت آب سلول، حفظ آماس سلولی و انسجام غشای سلول می‌شود (۶). البته گزارش‌های منتشر شده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد در شرایط تنش، اگرچه غلظت برخی آنتی‌اکسیدان‌ها زیاد می‌شود ولی تأثیری در جاروب

کردن<sup>۱</sup> رادیکال‌های آزاد ندارند. به عنوان نمونه، شنایدر و همکاران (۲۰۰۹) به این نتیجه رسیدند که در پنبه تحت تنش دمایی بالا، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز زیاد می‌شود ولی قادر به محافظت سلول‌ها در مقابل آسیب اکسیداتیو نیستند (۸).

اکنون این سؤال مطرح است که تغییر افزایشی در صفات زیست‌شیمیایی از جمله آنتی‌اکسیدان‌ها می‌تواند همواره باعث افزایش مقاومت به خشکی (زیست‌توده بیش‌تر) در شرایط واجد تنش خشکی شود؟ در این خصوص نتایج ضد و نقیضی منتشر شده است. به عنوان نمونه، در هفت وارپته جو تحت تنش، با افزایش شدت تنش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز افزایش یافت؛ با این حال تنها بین عملکرد دانه و آنزیم آسکوربات پراکسیداز یک رابطه مثبت به دست آمد (۹). جباری و همکاران (۲۰۱۶) نیز بر تغییرات ناشی از تنش خشکی در فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و پراکسیداز در سه وارپته گندم اشاره نمودند (۱۰). براساس گزارش آن‌ها، در شرایط تنش خشکی، همبستگی مثبتی بین عملکرد دانه و فعالیت آنزیم پراکسیداز وجود داشت؛ در مقابل، رابطه‌ای بین عملکرد دانه و کاتالاز به دست نیامد. در گلرنگ، رابطه عملکرد دانه با کاتالاز معنی‌دار گردید؛ در حالی که رابطه کاروتنوئید، آسکوربات پراکسیداز و پرولین با عملکرد دانه معنی‌دار نشد (۱۱). علی‌رغم افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی، رابطه آن با عملکرد دانه گیاه دارویی بالنگو (*Lallemantia royleana* Benth.) معنی‌دار به دست نیامده است (۱۲). رابطه عملکرد دانه گندم روئیده در شرایط دیم با پرولین، رابطه‌ای مثبت بوده است (۱۳).

اگر بین عملکرد دانه و مثلاً کاتالاز یک رابطه درجه دو (در مقادیر کم کاتالاز، با افزایش فعالیت این آنزیم عملکرد دانه زیاد می‌شود؛ در مقادیر زیاد کاتالاز، با افزایش فعالیت آنزیم عملکرد دانه تقلیل می‌یابد) وجود داشته باشد، ضریب همبستگی به دست آمده غیرمعنی‌دار خواهد بود چون محاسبات ضریب همبستگی مبتنی بر رابطه خطی بین متغیرهاست. افزون بر آن، بین آنتی‌اکسیدان‌ها برهمکنش پیچیده‌ای وجود دارد که با انجام تجزیه واریانس معمولی داده‌ها و محاسبه ضریب همبستگی نمی‌توان روابط آن‌ها را دقیق‌تر تحلیل نمود. به عنوان نمونه، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز هر دو از جاروب‌کنندگان پراکسید هیدروژن به شمار می‌آیند ولی کاتالاز از سرعت کم‌تری برای انجام واکنش با پراکسید هیدروژن برخوردار است (۱۴). در یک بررسی، دو وارپته موتانت (فاقد کاتالاز) و غیرموتانت (واجد کاتالاز) از لحاظ فعالیت آنزیم پراکسیداز مقایسه شدند؛ نتایج بیانگر آن بود که در وارپته موتانت، فعالیت آنزیم پراکسیداز خیلی بیش‌تر از وارپته غیرموتانت است (۱۵)؛ این یافته بر این واقعیت دلالت دارد که کاهش در فعالیت یک آنتی‌اکسیدان، می‌تواند توسط افزایش در فعالیت آنتی‌اکسیدان دیگر جبران شود.

هدف از این مطالعه، تأملی عمیق‌تر از گذشته بر برخی از پیچیدگی‌های فوق‌الذکر در روابط چند صفت زیست‌شیمیایی با مقاومت به خشکی کینوا بود. به طوری که با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندگانه مبتنی بر گزینش گام به گام، روابط غیرخطی، هم‌افزا (سینرژیسم) و هم‌کاه (آنتاگونیسم) صفاتی از جمله چند آنتی‌اکسیدان با وزن زیست‌توده بررسی گردید. علاوه بر این، برای یافتن بهترین ترکیب صفات زیست‌شیمیایی برای مقاومت به خشکی بالاتر کینوا در شرایط تنش خشکی، اقدام به بهینه‌سازی تابع

ارتفاع این دو مکان از سطح دریا به ترتیب ۱۱۱۰ و ۱۸۵۰ متر بوده و فاصله آن‌ها بر ۵۵ کیلومتر بالغ می‌گردد. فاکتورها شامل سطوح کم‌آبیاری (شاهد) (آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه)، کم‌آبیاری متوسط (۷۰ درصد)، و کم‌آبیاری شدید (۴۰ درصد) در کرت‌های اصلی، و محلول‌پاشی نیتروفنولات سدیم (شاهد) (پاشش آب معمولی بر روی گیاه)، محلول‌پاشی در زمان ساقه‌روی و محلول‌پاشی به هنگام گلدهی به میزان ۶ گرم در هکتار) در کرت‌های فرعی بود.

ریاضی (رگرسیون) حاصله شد. نتایج این مطالعه می‌تواند پیش‌زمینه‌ای برای انجام اصلاح نباتات در جهت مقاومت به خشکی بالاتر این گیاه باشد.

### مواد و روش‌ها

در سال ۱۳۹۹، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و دو مکان (دامغان (۳۶/۱۶) درجه شمالی و ۵۴/۳۳ درجه شرقی) و دیباج (۳۶/۴۳) درجه شمالی و ۵۴/۲۲ درجه شرقی)) به اجرا درآمد که برخی از ویژگی‌های اقلیمی این دو مکان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های اقلیمی مکان‌های مورد استفاده در آزمایش.

Table 1. Some climatic properties of locations used in the experiment.

Temperature (°C) دما			Relative humidity (%) رطوبت نسبی			ماه	مکان
حداکثر مطلق Absolute maximum	حداقل مطلق Absolute minimum	متوسط Average	حداکثر مطلق Absolute maximum	حداقل مطلق Absolute minimum	متوسط Average	Month	Location
31.3	8.5	19.9	81.4	9.9	39.6	Oridibehesht	اردیبهشت
38.4	13.3	25	84.7	11	36.3	Khordad	خرداد
40.6	15.2	28.2	73.7	9.9	34.1	Tir	تیر
37.6	16.6	27.9	73.7	13.2	37.4	Mordad	مرداد
36.8	12.9	25.1	87.9	12.1	46.2	Shahrivar	شهریور
33.7	7.9	20.2	91.1	16.5	44	Mehr	مهر
36.4	12.4	24.4	82.1	12.1	39.6	Average	متوسط
38.5	9	25.4	88.1	12.9	39.6	Oridibehesht	اردیبهشت
44	15.2	30	65.3	9.9	32.7	Khordad	خرداد
44.2	20.2	33.1	48.5	19.8	33.7	Tir	تیر
44.7	23.1	33.4	64.4	10.9	31.7	Mordad	مرداد
41.8	13.2	27	80.2	10.9	38.6	Shahrivar	شهریور
35.6	8.6	22.2	56.4	24.8	40.6	Mehr	مهر
41.5	14.9	28.5	67.2	14.9	36.2	Average	متوسط

نتایج آزمون خاک، تغذیه با کودهای شیمیایی مورد نیاز انجام پذیرفت. عملیات تهیه زمین شامل شخم عمیق، دو دیسک عمود بر هم در سال قبل انجام

جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش، نمونه‌برداری از خاک مزرعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد و بر اساس

گرفت و تاریخ کشت کینوا در دیباج و دامغان به ترتیب ۱۴۰۰/۰۲/۳۰ و ۱۴۰۰/۰۳/۰۵ بود. هر کرت آزمایشی واجد چهار ردیف کاشت به طول ۸ متر و با فواصل ردیف ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته ۵ سانتی‌متر بود. بین هر کرت اصلی، دو ردیف کشت نشده به عنوان حایل در نظر گرفته شد تا از تداخل احتمالی آبیاری جلوگیری گردد. جهت اطمینان از حصول یکنواختی در سبز شدن، کشت دستی بذور به صورت متراکم انجام شد و در مرحله ۴ تا ۶ برگی، با تنک نمودن مزرعه تراکم یکنواخت ایجاد گردید.

برای تعیین نیاز آبی کینوا و اعمال تیمارهای کم‌آب‌باری، داده‌های اقلیمی از ایستگاه هواشناسی دریافت گردید؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات<sup>۱</sup> و منطبق با معادله استاندارد جهانی فائو-پنمن-مانتیت<sup>۲</sup>، اقدام به محاسبه میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع شد. میزان ضریب گیاهی در دوره ابتدایی رشد، میانی و انتهایی رشد به ترتیب ۰/۵۸، ۱/۳ و ۰/۷۷ تبخیر و تعرق پتانسیل بود. براساس داده‌های حاصل از نرم‌افزار کراپ‌وات، فواصل متوسط آبیاری در شرایط آبیاری به میزان ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۲۱، ۱۶ و ۱۱ روز بود. در زمان پایان گلدهی، اقدام به نمونه‌برداری از برگ‌های انتهایی کاملاً توسعه یافته برای سنجش کمیت برخی صفات زیست‌شیمیایی گردید و در زمان رسیدگی (تاریخ برداشت در دیباج و دامغان به ترتیب ۱۴۰۰/۰۷/۲۹ و ۱۴۰۰/۰۸/۰۴ بود)، ۵ بوته برای محاسبه وزن خشک زیست‌توده مورد استفاده قرار گرفت.

**سنجش سوپراکسید دیسموتاز (SOD):** روش بی‌چامپ و فریدویچ (۱۹۷۱) برای سنجش SOD مورد استفاده قرار گرفت (۱۶). در این روش،

ریبوفلاوین و متیونین برای تولید سوپراکسید در مجاورت نور به کار گرفته می‌شود و سوپراکسید باعث احیای تترازولیوم نیترو آبی و تشکیل فورمازان بنفش می‌گردد. مخلوط واکنش تحت نور فلورسنت به مدت ۱۰ دقیقه انکوبه شد و میزان جذب در برابر بلانک در ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید.

**سنجش آنتوسیانین:** محتوای آنتوسیانین منطبق با رویه مورد استفاده میتا و همکاران (۱۹۹۷) تعیین شد (۱۷). نمونه برگ تازه (۲۰ میلی‌گرم) با ۳ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید (v/v) در متانول همگن گردید و سپس عصاره حاصله در شرایط تاریک در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. مخلوط در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید و سپس میزان جذب توسط مایع رویی (سوپرناتانت) در طول موج‌های ۵۳۰ و ۶۵۷ نانومتر قرائت شد. یک واحد آنتوسیانین برابر است با یک واحد جذب [A657 (0.25 × A530)] در هر میلی‌لیتر عصاره.

**تعیین میزان قندهای محلول:** مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره تهیه شده مورد استفاده قرار گرفت و به آن ۳ میلی‌لیتر معرف آنترون اضافه شد (۱۸). سپس به مدت ۱۰ دقیقه در حمام آب جوش قرار داده و پس از خنک شدن نمونه‌ها، اقدام به یادداشت‌برداری جذب آن‌ها در طول موج ۶۲۵ نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر گردید. از گلوکز خالص با غلظت‌های ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم جهت رسم منحنی استاندارد استفاده شد.

**سنجش غلظت پرولین:** روش بیتز و همکاران (۱۹۷۳) به عنوان الگوی تعیین مقدار پرولین برگ‌ها مدنظر قرار گرفت (۱۹). مقدار ۰/۲۵ گرم بافت برگ با ۵ میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک اسید ۳ درصد مخلوط، و نمونه در هاون چینی در یک محیط سرد هموزن شد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه

1- Cropwat  
2- FAO Penman Monteith



سنجش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD): فعالیت SOD بر اساس میزان بازدارندگی کاهش نوری<sup>۱</sup> تترازولیوم نیتروبلو (NBT) سنجیده شد (۲۱). مقدار کمی (۱۰ میکرولیتر) عصاره آنزیمی به محلول انکوباسیون اضافه گردید؛ این محلول شامل ۱۰۰ میکرولیتر فسفات پتاسیم (pH=۷/۸)، ۴۰ میکرولیتر متیونین ۷۰ میلی مولار، ۳ میکرولیتر EDTA<sup>۲</sup> ۱۰ میلی مولار، ۳۱ میکرولیتر آب، ۱۵ میکرولیتر NBT یک میلی مولار و ۲ میکرولیتر ریپوفلاوین ۰/۲ میلی مولار بود. لوله‌های حاوی محلول واکنش و ۱۰ میکرولیتر از نمونه به مدت ۷ دقیقه در نور لامپ فلورسنت ۲۰ وات نوردهی شدند. محلول واکنش فاقد نمونه، به عنوان شاهد مدنظر قرار گرفته و نوردهی شد. قرائت‌ها در طول موج ۵۶۰ نانومتر انجام شد و معادله رابطه ۱ برای محاسبه مورد استفاده قرار گرفت:

$$(1) \quad \text{درصد بازدارندگی} = \frac{(\text{محلول شاهد } A560 - \text{محلول واکنش } A560)}{\text{محلول شاهد } A560}$$

میکرولیتر آب و ۹ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۲ میلی مولار بود. برای محاسبه فعالیت آنزیم از تغییرات جذب نور در یک دقیقه اول استفاده شد.

**تعیین فعالیت آنزیم کاتالاز:** فعالیت این آنزیم براساس روش هاویر و مک‌هال (۱۹۸۷) محاسبه گردید (۲۳). مقدار کمی (۱۰ میکرولیتر) از عصاره آنزیمی به ۱۷۰ میکرولیتر محیط واکنش اضافه گردید؛ این محیط انکوبه شده در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد، حاوی ۹۰ میکرولیتر فسفات پتاسیم ۲۰۰ میلی مولار (pH=۷)، ۷۱ میکرولیتر آب و ۹ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۲۵۰ میلی مولار بود. بر اساس کاهش جذب

سانتی‌گراد، اقدام به سانتی‌فیوژ آن (۱۲۰۰۰ دور در دقیقه) گردید. پس از اضافه نمودن ناین‌هیدرین و اسید استیک گلاسیال به سوپرناتانت عصاره، نمونه‌ها به مدت یک ساعت در حمام آب گرم در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و بعد اقدام به سرد کردن نمونه‌ها در حمام آب یخ شد. در نهایت، غلظت پرولین با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر سنجیده شد.

**سنجش کاروتنوئید:** جهت سنجش این آنتی‌اکسیدان غیرآنزیمی، از روش هیسکوس و ایزرائیلستام (۱۹۷۹) استفاده شد (۲۰). مقدار ۰/۲۵ گرم وزن تر برگ به همراه ۵ میلی‌لیتر دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) در فالكون گذاشته شد و به مدت ۴ ساعت در آن تنظیم شده روی دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد، نگهداری گردید. سپس جذب نور با اسپکتروفتومتر مدل S2000 UV/VIS در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. در نهایت، بر اساس رابطه (معادله) ارایه شده توسط دو پژوهش‌گر فوق‌الذکر، میزان کاروتنوئید محاسبه گردید.

یک واحد SOD قادر است ۵۰ درصد از کاهش نوری NBT را مهار نماید.

**اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز:** فعالیت این آنزیم بر اساس سرعت اکسیداسیون آسکوربات در ۲۹۰ نانومتر در هر ۱۵ ثانیه سنجیده شد؛ مدت زمان این سنجش، ۳ دقیقه بود (۲۲). مقدار کمی (۱۰ میکرولیتر) از عصاره آنزیمی به ۱۷۰ میکرولیتر بافر انکوباسیون اضافه شد؛ این بافر شامل ۹۰ میکرولیتر فسفات پتاسیم ۲۰۰ میلی مولار (pH=۷)، ۹ میکرولیتر آسکوربیک اسید ۱۰ میلی مولار، ۶۲

1- Photoreduction  
2- Ethylenediaminetetraacetic acid

### نتایج و بحث

نتایج مربوط به داده‌های اقلیمی بیانگر آن است که در یک دوره ۶ ماهه، به‌طور متوسط دامغان حدود ۴ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر از دیباج بوده است (جدول ۱). از طرف دیگر رطوبت نسبی آن، حدود ۳ درصد کم‌تر از دیباج به‌دست آمد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که همه اثرات تیمارها و برهمکنش آن‌ها بر صفات مورد بررسی معنی‌دار بود (نتایج ارایه نشده). به جزء صفات آنتوسیانین، پرولین، و کاروتنوئید، کمیت بقیه صفات در دو مکان از لحاظ آماری متفاوت بود.

در بررسی‌های مربوط به تجزیه رگرسیونی، داده‌های شاهد و کم‌آبیری متوسط (تأمین ۷۰ درصد آب مورد نیاز گیاه) وارد تجزیه نگردید چون با افزایش شدت تنش خشکی، زیست‌توده کم می‌شود و غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها افزایش می‌یابد؛ در نتیجه ممکن است حاصل آن به‌صورت یک ضریب همبستگی منفی (اثر منفی آنتی‌اکسیدان بر زیست‌توده) خودنمایی نماید. تمرکز این مطالعه بر روابط برخی صفات زیست‌شیمیایی با مقاومت به خشکی بود. برخی از ویژگی‌های آماری (توصیفی) صفات مورد بررسی در شرایط کم‌آبیری شدید در جدول ۲ آورده شده است. دامنه تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در همه صفات به‌دست آمد که ناشی از شرایط اقلیمی، ادافیکی و تیمارها (به‌جز کم‌آبیری چون سطح مورد استفاده آن در اینجا ثابت است) می‌باشد. بیش‌ترین دامنه تغییرات (۳۲/۹۴ درصد) مربوط به زیست‌توده یا عملکرد بیولوژیکی است. کاروتنوئید در رده بعدی قرار گرفت. پرولین کم‌ترین دامنه تغییرات را داشت؛ با این حال، دامنه تغییرات آن بر ۸ درصد بالغ گردید. قابل‌ملاحظه شدن دامنه تغییرات در این مطالعه، زمینه را برای اعتبار بیش‌تر نتایج تجزیه رگرسیون فراهم آورده است.

در ۲۴۰ نانومتر در هر ۱۵ ثانیه و مصرف پراکسید هیدروژن، فعالیت کاتالاز ثبت گردید.

برای تعیین میزان مشارکت قندهای محلول و سایر آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی معنونه<sup>۱</sup> (رگرسور؛ متغیرهای تأثیرگذار؛ X) در مقاومت به خشکی (زیست‌توده؛ عملکرد بیولوژیکی؛ Y) از رگرسیون چندگانه غیرخطی واجد برهمکنش چندسویه استفاده گردید. به‌طوری‌که تأثیر روابط درجه یک (خطی)، درجه دو و درجه سه رگرسورها با مقاومت به خشکی لحاظ گردید، برهمکنش دو، سه و چندگانه رگرسورها با یکدیگر وارد مدل رگرسیونی شد، و در نهایت روابط سینرژیک و آنتاگونیست رگرسورها مورد کنکاش قرار گرفت. بعد از آن، با استفاده از نرم‌افزار SAS، انتخاب رگرسورهای تأثیرگذار بر مقاومت به خشکی بر اساس رویه گزینش گام به گام<sup>۲</sup> صورت پذیرفت؛ در این رویه، اثر رگرسورهای غیرمؤثر در مدل رگرسیونی بر روی مقاومت به خشکی حذف می‌گردد. شایان ذکر است که برای میسر نمودن مقایسه اثرات رگرسورها با یکدیگر، رابطه ۲ برای نرمال نمودن کل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_j} \quad (2)$$

که در آن،  $n_{ij}$  برابر است با داده نرمال شده در ردیف  $i$ ام و متغیر  $j$ ام،  $x_{ij}$  داده نرمال نشده در ردیف  $i$ ام و متغیر  $j$ ام، و  $\max x_j$  بزرگ‌ترین کمیت متغیر  $j$ ام. پس از انجام گزینش، برای به‌دست آوردن بهترین ترکیب رگرسورهای مورد آزمون در جهت حصول حداکثر مقاومت به خشکی، اقدام به حداکثرسانی<sup>۳</sup> (بهینه‌سازی) تابع رگرسیونی گردید؛ نرم‌افزار ریاضی MATLAB برای بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۱- عنوان شده

- 2- Stepwise selection
- 3- Maximizing
- 4- Optimizing

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های آماری (توصیفی) صفات مورد مطالعه در شرایط کم‌آبیاری شدید (تأمین ۴۰ درصد آب مورد نیاز گیاه)، و هم‌چنین مقدار بهینه شده رگسورها پس از به حداکثرسانی تابع رگرسیونی مبتنی بر ضرایب مندرج در جدول ۳.

**Table 2. Some of the statistical (descriptive) characteristics of the studied traits under severe deficit irrigation conditions (providing 40% of the plant water requirement), as well as the optimized value of regressors after maximizing the regression function based on the coefficients listed in Table 3.**

عملکرد بیولوژیکی (kg ha <sup>-1</sup> ) Biological yield	کاروتنوئید (mg g <sup>-1</sup> FW) Carotenoid	پروترین (mg g <sup>-1</sup> FW) Proline	آنتوسیانین (mg g <sup>-1</sup> FW) Anthocyanin	قندهای محلول (mg g <sup>-1</sup> FW) Soluble sugars	کاتالاز (μmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> min <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> FW) Catalase	آسکوربات پراکسیداز (μmol ascorbate min <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> FW) Ascorbate peroxidase	سوپراکسید دیسموتاز (Unit SOD g <sup>-1</sup> FW) Superoxide dismutase	ویژگی آماری
5115	14.39	6.74	2.16	5.68	2.14	7.90	512.4	حداقل Min.
6800	18.91	7.31	2.40	6.80	2.54	9.00	613.7	حداکثر Max.
1685	4.52	0.57	0.24	1.11	0.40	1.10	101.3	دامنه Range
5957	16.65	7.02	2.28	6.24	2.34	8.45	563.0	متوسط Average
32.94	31.41	8.46	11.11	19.71	18.65	13.98	19.8	# درصد Percent
7412	18.80	6.79	2.15	6.65	2.28	8.58	600.2	بهینه Optimized

#: درصد (درصد تغییر) نشان‌دهنده حاصل تقسیم مقدار حداکثر به مقدار حداقل است؛ از حاصل تقسیم یک واحد کسر شده و به صورت درصد بیان می‌گردد

#: Percent (percentage of change) represents the result of dividing the maximum value by the minimum value; One unit is deducted from the division result and expressed as a percentage

که جذر ضریب توان دوم کاروتنوئید محاسبه گردد که برابر با ۲/۱۱ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که غلظت‌های بالاتر کاروتنوئید اندکی بیش‌تر از غلظت‌های کم آن تأثیر مثبت بر مقاومت به خشکی برجای می‌گذارند. برای ادراک عمیق‌تر اثرات درجه اول و درجه دوم، دو حالت برای داده‌های فرضی در شکل ۱ آورده شده است.

نتایج تجزیه واریانس مربوط به اثر رگسورها بر مقاومت به خشکی (زیست‌توده) معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۳). یکی از رگسورهای باقی‌مانده پس از گزینش، کاروتنوئید می‌باشد. تأثیر درجه سوم این رگسور معنی‌دار نشد و طی مراحل گزینش حذف گردید؛ تنها اثرات خطی و درجه دوم آن معنی‌دار به‌دست آمد. ضرایب درجه اول (خطی) و درجه دوم به ترتیب ۱/۹۷ و ۴/۴۵ بود. برای مقایسه لازم هست

جدول ۳- تجزیه واریانس کلی رگسورهای مورد آزمون و اثر هر یک از رگسورها بر مقاومت به خشکی (زیست توده) کینوا.

**Table 3. Analyzing the overall variance of the tested regressors and the effect of each of the regressors on drought resistance (biomass) of quinoa.**

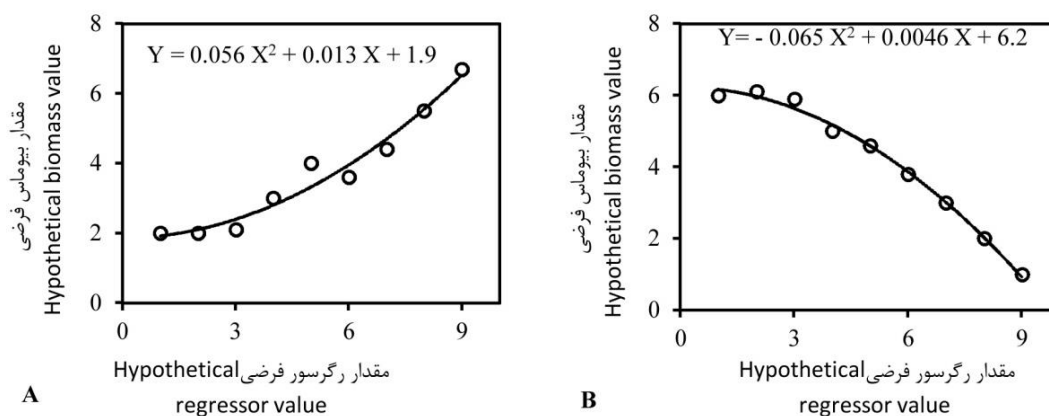
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	مجموع مربعات SS	میانگین مربعات MS	مقدار F F	سطح احتمال P
رگسورها Regressors	12	0.27908	0.02326	18616.7	<0.01
خطا Error	41	0.0005122	0.0000125		
کل اصلاح شده Corrected total	53	0.27913			

# رگسورها Regressors	اثر رگسور Regressor effect	خطای استاندارد Standard error	مجموع مربعات SS	مقدار F F	سطح احتمال P
عرض از مبدأ Intercept	2.249	0.833	6E-9.1	7.28	0.01
کاروتنوئید Carotenoid	1.967	0.274	5E-6.45	51.61	<0.01
پرولین Proline	-3.897	1.434	6E-9.22	7.38	<0.01
قندهای محلول Soluble sugars	-1.645	0.422	5E-1.9	15.17	<0.01
کاروتنوئید- قند Carotenoid-Soluble sugars	-9.607	0.605	4E-3.2	252.03	<0.01
پرولین- کاتالاز Proline-Catalase	91.230	15.241	5E-4.5	35.88	<0.01
پرولین- قندهای محلول Proline-Soluble sugars	-79.509	12.695	5E-4.9	39.23	<0.01
پرولین- سوپراکسیددیسموتاز Proline-Superoxide dismutase	-7.024	1.890	5E-1.8	13.18	<0.01
قند- سوپراکسیددیسموتاز Soluble sugars_Superoxide dismutase	7.226	1.976	5E-1.7	13.38	<0.01
کارتنوئید <sup>2</sup> Carotenoid <sup>2</sup>	4.405	0.301	4E-2.7	214.68	<0.01
آنتوسیانین <sup>2</sup> Anthocyanin <sup>2</sup>	-1.546	0.0556	4E-9.6	768.9	<0.01
کاتالاز <sup>2</sup> Catalase <sup>2</sup>	-47.063	8.030	5E-4.3	34.35	<0.01
آسکوربات پراکسیداز <sup>2</sup> Ascorbate prooxidase <sup>2</sup>	44.196	6.262	5E-6.2	49.81	<0.01

# در رگرسیون پلی‌نومیال، رگسور به توان یک (X) مربوط به اثر غلظت‌های (مقادیر) کم رگسور می‌باشد و رگسور به توان دو (X<sup>2</sup>) مربوط به اثر غلظت‌های (مقادیر) زیاد رگسور بر زیست توده است. شکل ۱ و معادلات مندرج مربوطه می‌توانند به تبیین این نکته کمک کنند.

#: In polynomial regression, the regressor to the power of one (X) is related to the effect of low concentrations (values) of the regressor, and the regressor to the power of two (X<sup>2</sup>) is related to the effect of high concentrations (values) of the regressor on biomass. Figure 1 and related equations can help to explain this issue



شکل ۱- حالت کم بودن (یا معنی دار نبودن) اثر مثبت مقادیر کم رگرسور (ضریب X در معادله) و زیاد بودن (معنی دار بودن) اثر مثبت مقادیر زیاد رگرسور فرضی (ضریب X<sup>2</sup> در معادله) بر بیوماس (A)، و حالت کم بودن (یا معنی دار نبودن) اثر مقادیر کم رگرسور (ضریب X در معادله) و زیاد بودن (معنی دار بودن) اثر منفی مقادیر زیاد رگرسور (ضریب X<sup>2</sup> در معادله) بر بیوماس (B). شایان ذکر است که برای قیاس، مجذور ضریب X<sup>2</sup> باید با ضریب X مورد مقایسه قرار بگیرد.

**Fig. 1.** The state of low (or not significant) positive effect of low regressor values (X coefficient in the equation) and high (significant) positive effect of high regressor values (X<sup>2</sup> coefficient in the equation) on biomass (A), and the state of low (or non-significant) effect of low regressor values (X coefficient in the equation) and high (significant) negative effect of high regressor values (X<sup>2</sup> coefficient in the equation) on biomass, (B). It is worth mentioning that for comparison purposes, the square root of X<sup>2</sup> coefficient should be compared with the coefficient X.

بازدارندگی نوری<sup>۲</sup> و آسیب به فتوسیستم II در شرایط تنش خشکی (نور در دسترس بیش از توان کلروفیلها در جذب آن است به ویژه این که مقاومت مزوفیلی و روزنه ای باعث تقلیل راندمان استفاده از نور می شود) در امان نگه دارند؛ در این راستا، تبدیل زاکسانتین و ویولاکسانتین<sup>۳</sup> به یکدیگر قابل توجه است (۲۵). شایان ذکر است که بر اساس نتایج منتشر شده، شاید هیچ مطالعه (تجزیه و تحلیل) مشابهی صورت نگرفته است که بتوان نتایج این مطالعه را با آن به طور دقیق و به تفصیل مقایسه نمود.

همان طوری که در نتایج مربوط به مقایسه میانگینها برای همه سطوح مکان، کم آبیاری و محلول پاشی آورده شده است (جدول ۴) بالاترین مقدار کاروتنوئید، در شرایط بدون تنش آبی دیباج و محلول پاشی نیتروفنولات سدیم در زمان گلدهی حاصل گردید. در شرایط کم آبیاری شدید دیباج و دامغان، کمیت این صفت کم تر از شرایط دیگر کم آبیاری به دست آمد. بر اساس نتایج بهینه سازی تابع، غلظت ۱۸/۸ میلی گرم بر گرم وزن تر کاروتنوئید به عنوان مطلوب ترین غلظت برای حصول حداکثر مقاومت به خشکی شناخته شد. کاروتنوئیدها آنتی اکسیدان های لیپوفیل<sup>۱</sup> هستند که سوپراکسید را جاروب می نمایند (۲۴)؛ افزون بر آن، نور ۴۰۰-۵۵۰ نانومتر را جذب نموده و می توانند گیاه را از

2- Photoinhibition  
3- Zeaxanthin and violaxanthin

۱- ماده ای که دارای قابلیت ترکیب شدن با چربی (لیپید) یا حل شدن در چربی را دارد

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در شرایط کم آبیاری شدید (تأمین ۴۰ درصد آب مورد نیاز گیاه)، متوسط (۷۰ درصد)، و آبیاری کامل (شاهد: ۱۰۰ درصد) و محلول پاشی نیتروفنولات سدیم در دو مرحله نموی گیاه (شاهد: پاشش آب معمولی).

**Table 4. Mean comparison of the studied traits under severe irrigation conditions (providing 40% of the water required by the plant), medium (70%), and full irrigation (control; 100%) and sodium nitrophenolate foliar spraying in two stages of plant development (Control: tap water spraying).**

شدهای محلول (mg g <sup>-1</sup> FW) Soluble sugars	کاتالاز ( $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ FW}$ ) Catalase	آسکوربات پراکسیداز ( $\mu\text{mol ascorbate min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ FW}$ ) Ascorbate peroxidase	سوپراکسید دیسموتاز (Unit SOD g <sup>-1</sup> FW) Super oxide dismutase	نیتروفنولات سدیم Sodium Nitro phenolate	کم آبیاری deficit irrigation	مکان Location
4.5 <sup>FG</sup>	1.6 <sup>EFG</sup>	2.96 <sup>I</sup>	499 <sup>DEFG</sup>	شاهد Control		
4.2 <sup>G</sup>	1.49 <sup>G</sup>	3.15 <sup>HI</sup>	472 <sup>EFG</sup>	ساقه‌روی Stemming	100%	
4.3 <sup>G</sup>	1.53 <sup>FG</sup>	2.76 <sup>J</sup>	548 <sup>DEF</sup>	گل‌دهی Flowering		
5.11 <sup>DEF</sup>	1.84 <sup>CDEFG</sup>	6.30 <sup>F</sup>	967 <sup>B</sup>	شاهد Control		دامغان Damghan
5.26 <sup>CDE</sup>	1.9 <sup>BCDEF</sup>	6.91 <sup>E</sup>	1074 <sup>A</sup>	ساقه‌روی Stemming	70%	
5.03 <sup>EF</sup>	1.81 <sup>DEFG</sup>	7.11 <sup>E</sup>	930 <sup>B</sup>	گل‌دهی Flowering		
6.21 <sup>AB</sup>	2.34 <sup>A</sup>	8.07 <sup>C</sup>	602 <sup>D</sup>	شاهد Control		دیباج Dibaj
6.2 <sup>AB</sup>	2.34 <sup>A</sup>	8.27 <sup>BC</sup>	574 <sup>DE</sup>	ساقه‌روی Stemming	40%	
5.8 <sup>BCD</sup>	2.19 <sup>ABCD</sup>	8.06 <sup>C</sup>	536 <sup>DEFG</sup>	گل‌دهی Flowering		
4.59 <sup>EFG</sup>	1.73 <sup>EFG</sup>	3.21 <sup>GHI</sup>	461 <sup>FG</sup>	شاهد Control		دیباج Dibaj
4.29 <sup>G</sup>	1.62 <sup>EFG</sup>	3.42 <sup>G</sup>	436 <sup>G</sup>	ساقه‌روی Stemming	100%	
4.82 <sup>EFG</sup>	1.82 <sup>DEFG</sup>	3.28 <sup>GH</sup>	461 <sup>FG</sup>	گل‌دهی Flowering		
5.95 <sup>ABC</sup>	2.24 <sup>ABC</sup>	7.68 <sup>D</sup>	794 <sup>C</sup>	شاهد Control		دیباج Dibaj
6.58 <sup>A</sup>	2.48 <sup>A</sup>	9.06 <sup>A</sup>	820 <sup>C</sup>	ساقه‌روی Stemming	70%	
5.14 <sup>DEF</sup>	1.94 <sup>BCDE</sup>	7.59 <sup>D</sup>	871 <sup>BC</sup>	گل‌دهی Flowering		
6.34 <sup>AB</sup>	2.39 <sup>A</sup>	8.25 <sup>BC</sup>	589 <sup>D</sup>	شاهد Control		دیباج Dibaj
6.61 <sup>A</sup>	2.49 <sup>A</sup>	8.82 <sup>A</sup>	538 <sup>DEF</sup>	ساقه‌روی Stemming	40%	
6.06 <sup>AB</sup>	2.29 <sup>AB</sup>	8.42 <sup>B</sup>	512 <sup>DEFG</sup>	گل‌دهی Flowering		

ادامه جدول ۴ -

Continue Table 4.

عملکرد بیولوژیکی (kg ha <sup>-1</sup> ) Biological yield	کاروتنوئید (mg g <sup>-1</sup> FW) Carotenoid	پرولین (mg g <sup>-1</sup> FW) Proline	آنتوسیانین (mg g <sup>-1</sup> FW) Anthocyanin	نیتروفنولات سدیم Sodium Nitrophenolate	کم آبیاری deficit irrigation	مکان Location
13490 <sup>A</sup>	20.2 <sup>DE</sup>	5.15 <sup>G</sup>	1.1 <sup>EF</sup>	شاهد Control		
12690 <sup>AB</sup>	25.4 <sup>B</sup>	5 <sup>G</sup>	1.2 <sup>DEF</sup>	ساقه‌روی Stemming	100%	
13470 <sup>A</sup>	24.8 <sup>B</sup>	4.99 <sup>G</sup>	1 <sup>F</sup>	گل‌دهی Flowering		
9057 <sup>C</sup>	19.8 <sup>DE</sup>	6.41 <sup>BCD</sup>	1.4 <sup>CD</sup>	شاهد Control		دامغان Damghan
8951 <sup>C</sup>	22.1 <sup>CD</sup>	5.96 <sup>DEF</sup>	1.3 <sup>CDE</sup>	ساقه‌روی Stemming	70%	
8808 <sup>C</sup>	21.3 <sup>D</sup>	6.1 <sup>DE</sup>	1.4 <sup>CD</sup>	گل‌دهی Flowering		
5741 <sup>DE</sup>	17.2 <sup>FG</sup>	7.01 <sup>AB</sup>	2.3 <sup>A</sup>	شاهد Control		
6667 <sup>D</sup>	17.3 <sup>FG</sup>	6.99 <sup>AB</sup>	2.2 <sup>A</sup>	ساقه‌روی Stemming	40%	
6302 <sup>DE</sup>	18.5 <sup>EF</sup>	6.88 <sup>ABC</sup>	2.2 <sup>A</sup>	گل‌دهی Flowering		
13120 <sup>A</sup>	24.7 <sup>B</sup>	5.29 <sup>FG</sup>	1.12 <sup>EF</sup>	شاهد Control		
11700 <sup>B</sup>	25.4 <sup>B</sup>	5.18 <sup>G</sup>	1.23 <sup>CDEF</sup>	ساقه‌روی Stemming	100%	
11740 <sup>B</sup>	28 <sup>A</sup>	4.94 <sup>G</sup>	1.12 <sup>EF</sup>	گل‌دهی Flowering		
8302 <sup>C</sup>	20.2 <sup>DE</sup>	6.16 <sup>CDE</sup>	1.63 <sup>B</sup>	شاهد Control		دیباج Dibaj
8188 <sup>C</sup>	21.5 <sup>CD</sup>	6.11 <sup>DE</sup>	1.63 <sup>B</sup>	ساقه‌روی Stemming	70%	
8136 <sup>C</sup>	23.8 <sup>BC</sup>	5.65 <sup>EFG</sup>	1.43 <sup>BC</sup>	گل‌دهی Flowering		
5219 <sup>E</sup>	14.7 <sup>H</sup>	7.17 <sup>A</sup>	2.35 <sup>A</sup>	شاهد Control		
6118 <sup>DE</sup>	15.9 <sup>GH</sup>	7.03 <sup>AB</sup>	2.35 <sup>A</sup>	ساقه‌روی Stemming	40%	
5619 <sup>DE</sup>	17 <sup>FGH</sup>	7.1 <sup>AB</sup>	2.3 <sup>A</sup>	گل‌دهی Flowering		

با نیتروفنولات سدیم نتوانست تغییر قابل توجهی در غلظت اسید آمینه پرولین ایجاد نماید. با محاسبه مجذور ضریب مربوط به برهمکنش‌ها (اثرات توأمان)

به‌طورکلی در شرایط کم‌آبیاری شدید هر دو مکان، غلظت پرولین و کاتالاز در بافت برگ بالاتر از شرایط دیگر کم‌آبیاری بود (جدول ۴). محلول پاشی

می‌توان تا حدودی<sup>۱</sup> امکان مقایسه آن‌ها با اثر رگسورهای دیگر را فراهم نمود. بر همین اساس، بزرگ‌ترین تأثیر ( $\sqrt[2]{91.23} = 9.55$ ) مربوط به اثر توأمان پرولین و کاتالاز بر مقاومت به خشکی می‌باشد. شایان ذکر است که تأثیر منفرد مقادیر کم کاتالاز معنی‌دار نشد و از مدل رگرسیونی حذف گردید؛ با این حال تأثیر مقادیر زیاد کاتالاز (ضریب  $X^2$ ) بر مقاومت به خشکی، تأثیری کاهنده و نسبتاً شدید ( $-\sqrt[2]{47.06} = -6.86$ ) بود. با لحاظ این موارد، به نظر می‌رسد که افزایش همزمان پرولین و کاتالاز به عنوان بهترین صفات زیست شیمیایی مرتبط با مقاومت به خشکی می‌تواند مدنظر اصلاح‌گران و فیزیولوژیست‌ها قرار بگیرد؛ چون آن‌ها می‌توانند تأثیری سینرژیسم (هم‌افزا) بسیار شدید به جای گذارند  $\{((-\sqrt[2]{3/897})+(-\sqrt[2]{1/645}))\}$ . نتیجه به‌حداکثرسانی تابع رگرسیونی برای آنزیم کاتالاز معادل  $2/28 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ FW}$  بود. در یک بررسی گزارش شد که کاتالاز قادر نیست همه پراکسید هیدروژن را جاروب نماید (۲۶). این وضعیت توسط اشنایدر و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش شده است (۸). در برنج، بین عملکرد دانه و کاتالاز همبستگی مثبت به‌دست آمده است (۲۷).

تأثیر پرولین در مقاومت به خشکی کینوا منفی بود؛ افزون بر آن، تأثیر درجه دوم آن (غلظت زیاد) معنی‌دار نشد و در مدل رگرسیونی نهایی باقی نماند. بر همین اساس می‌توان گفت که غلظت کم پرولین، اثری منفی بر مقاومت به خشکی دارد؛ شاید تأثیر منفی ناشی از افزایش آن، مربوط به مصرف

۱- برهمکنش‌های دوگانه نمادی از حاصل ضرب دو عدد نرمال شده می‌باشد؛ این دو عدد نرمال شده ممکن است کاملاً برابر نباشند. از این‌رو، مجذور آنها یک درک صرفاً تخمینی (ولی نزدیک به واقعیت) از بزرگی اثرگذاری در اختیار کاربران قرار می‌دهد.

کربوهیدرات سنتز شده توسط فتوسنتز در شرایط محدودیت روزنه‌ای و غیرروزنه‌ای (مقاومت مزوفیلی) ناشی از تنش خشکی باشد. این نتیجه‌گیری می‌تواند توسط تأثیر منفی ناشی از افزایش توأمان پرولین و قندهای محلول تأیید گردد. شایان ذکر است که همانند پرولین، اثر غلظت‌های کم قندهای محلول بر مقاومت به خشکی کاهنده بود و اثر غلظت‌های بالای آن بی‌تأثیر. افزون بر آن، این دو تأثیری آنتاگونیست بر مقاومت به خشکی بر جای می‌گذارند؛ چون اثر کاهندگی توأمان آن‌ها (قدر مطلق عدد منفی) بیش‌تر از تأثیر تقلیل‌دهنده تک تک‌شان جلوه می‌نماید  $\{(-\sqrt[2]{8/917}) < ((-\sqrt[2]{3/897})+(-\sqrt[2]{1/645}))\}$ . براساس نتایج بهینه‌سازی تابع رگرسیونی، غلظت ۶/۷۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر اسید آمینه پرولین به عنوان بهترین غلظت منجر به حداکثر مقاومت به خشکی شناخته شد. در همین راستا، بهترین غلظت قندهای محلول برابر با ۶/۶۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد. در بررسی مروری سوفو و همکاران (۲۰۱۵) مشخص شده است که در بسیاری از گیاهان دیگر، پرولین نقش مثبتی در مقاومت به خشکی داشته است؛ همانند کربوهیدرات (قند)‌های محلول، پرولین می‌تواند در تعدیل اسمزی گیاه مشارکت نماید (۲۸). در این بررسی، با افزایش شدت کم‌آبایی در هر دو مکان، غلظت قندهای محلول به طور خطی افزایش نشان داد (جدول ۴).

در شرایط کم‌آبایی متوسط (۷۰ درصد نیاز گیاه) هر دو مکان، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز بالاتر از شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد) و کم‌آبایی شدید (۴۰ درصد) به‌دست آمد (جدول ۴). در این شرایط کم‌آبایی دامغان، محلول‌پاشی با نیتروفنولات سدیم در مرحله ساقه‌روی باعث افزایش فعالیت آنزیم مذکور گردید؛ این در حالی است که در دیباج، این تأثیر محلول‌پاشی صادق نبود. سوپراکسید دیسموتاز



پراکسیزم‌های سلول، پراکسید هیدروژن تنها توسط کاتالاز به آب تجزیه می‌گردد (۳۰).

در شرایط کم‌آبیاری نسبت به آبیاری کامل در هر دو مکان، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز خیلی بالاتر (حدود دو برابر) بود (جدول ۴). ضریب رگرسیونی آنزیم آسکوربات پراکسیداز تنها در حالت درجه دوم معنی‌دار شد که علاوه بر مثبت بودن (تأثیر افزایش یافته داشتن)، کمیت آن نیز به طور نسبی بزرگ است ( $\sqrt{44.196} = 6.65$ ). از این رو می‌توان گفت که در محدوده فعالیت بالای این آنزیم، اثرات منفی تنش اکسیداتیو به طور قابل‌توجهی تقلیل می‌یابد. مطلوب‌ترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در جهت حصول بیش‌ترین زیست‌توده برابر با  $8/58 \mu\text{mol ascorbate min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{FW}$  اهمیت آسکوربات پراکسیداز در شرایط تنش خشکی، علاوه بر جاروب کردن پراکسید هیدروژن، شامل محافظت نوری کلروپلاست و سیتوسل می‌باشد (۳۱).

آنتوسیانین شامل یک گروه وسیعی از رنگدانه‌های محلول در آب از خانواده فلاونوئیدها می‌باشد که عمدتاً مسئول رنگ گیاهان و میوه‌ها شناخته می‌شود و در مسیر زیست‌شیمیایی فنیل‌پروپانویید سنتز می‌گردد (۳۲). به موازات افزایش شدت کم‌آبیاری در هر دو مکان این بررسی، غلظت آنتوسیانین به‌طور خطی افزایش نشان داد (جدول ۴). مطلوب‌ترین غلظت آنتوسیانین در جهت حصول بیش‌ترین مقاومت به خشکی معادل با  $2/15$  میلی‌گرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد که  $0/01$  میلی‌گرم بر گرم وزن تر بیش‌تر از کم‌ترین مقدار مشاهده شده در شرایط کم‌آبیاری شدید است (جدول ۲). عدم معنی‌دار شدن تأثیر غلظت‌های کم این ماده آلی و افزون بر آن، منفی به‌دست آمدن اثر غلظت‌های بالای آن تأییدی است بر کم بودن غلظت مورد نیاز آن برای حصول بالاترین مقاومت به خشکی در کینوا. مهم‌تر از این دو نکته،

اصطلاحاً "به خودی خود" تأثیری معنی‌داری بر مقاومت به خشکی به‌دنبال نداشت، ولی در مجاورت قندهای محلول (تأثیر توأمان)، از لحاظ آماری اثرش اصطلاحاً "قابل لمس و محسوس" ( $\sqrt{7.226} = 2.69$ ) گردید؛ به بیان دیگر، در صورتی که غلظت قندهای محلول افزایش یابد، بیش‌تر شدن فعالیت این آنزیم آنتی‌اکسیدان نیز می‌تواند تأثیری افزایشی بر مقاومت به خشکی به جای گذارد. با این حال به‌نظر می‌رسد که نمی‌توان این تأثیر مثبت توأمان را قابل توجه دانست؛ زیرا (الف) اثر قندهای محلول به صورت منفرد (تکی) منفی می‌باشد، (ب) اثر تکی سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار به‌دست نیامد، و (ج) اثر توأمان این دو ( $2/69$ )، به طور نسبی تأثیری شگرف نیست. به هر صورت، بهترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز برای حصول حداکثر مقاومت به خشکی برابر با  $600/2 \text{ Unit SOD g}^{-1} \text{FW}$  می‌باشد که اندکی بالاتر از مقدار متوسط مشاهده شده است (جدول ۲). نتایج این بررسی با یافته‌های برخی از پژوهش‌گران دیگر در خصوص افزایش بی‌تأثیر این آنزیم بر مقاومت به خشکی مطابقت دارد. به عنوان نمونه، اشنایدر و همکاران (۲۰۰۹) گزارش نمودند که در پنبه تحت تنش دمای بالا، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز زیاد می‌شود ولی قادر به محافظت سلول‌ها در مقابل آسیب اکسیداتیو نیستند (۸). بین سوپراکسید دیسموتاز و عملکرد گندم در شرایط تنش رابطه‌ای مثبت، و در شرایط بدون تنش رابطه‌ای منفی گزارش شده است (۶). در ژنوتیپ‌های گندم، همبستگی فعالیت این آنزیم با عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار گزار شده است (۲۹). جاروب کردن  $\text{O}_2^-$  و تبدیل آن به پراکسید هیدروژن یکی از نقش‌های این آنزیم است. پراکسید هیدروژن توسط آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، گلوکاتایون پراکسیداز و فنل پراکسیداز به آب تجزیه می‌شود، با این حال در

تغییری در مقاومت به خشکی ایجاد نشد) ولی اثر غلظت‌های بالاتر کاتالاز و آنتوسیانین اثری کاهشدهنده، و اثر غلظت‌های بالاتر آسکوربات پراکسیداز اثری افزایشدهنده بود. در مقابل، هم تأثیر غلظت‌های کم و هم تأثیر غلظت‌های بالاتر کاروتنوئید افزایشدهنده بود؛ به انضمام این‌که، اثر مثبت غلظت‌های بالاتر کاروتنوئید اندکی بیش‌تر از اثر غلظت‌های کم آن شد. پرولین و کاتالاز بالاترین تأثیر را بر مقاومت به خشکی به جای گذاردند به شرطی که افزایش آنها توأمان در نظر گرفته شد. اثر قندهای محلول منفی به‌دست آمد؛ به‌ویژه این‌که افزایش توأمان قندهای محلول با پرولین منجر به کاهش شدید مقاومت به خشکی گردید؛ از این‌رو به نظر می‌رسد افزایش این دو نباید مدنظر اصلاح‌گران قرار بگیرد. بهترین ترکیب از غلظت‌های این مواد آلی (جدول ۲) که با به حداکثر رسانی تابع رگرسیونی حاصل شد منجر به افزایش ۹ درصد زیست‌توده نسبت به بالاترین مقدار مشاهده شده زیست‌توده گردید. شایان ذکر است که همه مقادیر بهینه رگسورها در دامنه مشاهده شده در آزمایش می‌باشد که می‌تواند توسط اصلاح‌گران در جهت دستکاری ژنتیکی مورد استفاده قرار بگیرد.

نکته مربوط به معنی‌دار نشدن برهمکنش این رگرسور (نداشتن تأثیر توأمان) با دیگر رگسورهای مورد بررسی در این مطالعه است. معنی‌دار نشدن اثر ناشی از افزایش غلظت این ماده بر مقاومت به خشکی شاید مربوط به غلظت بسیار بالای این ماده در کینوا (متمایل به قرمز بودن گیاه در برخی واریته‌های کینوا) به‌ویژه در اواخر دوره رشد و نمو باشد. به طور کلی در گیاه، این ماده دو نقش مهم به‌عهده دارد: (الف) محافظت گیاه در مقابل نور شدید خورشید به‌ویژه این‌که در برخی واریته‌های کینوا رنگ متمایل به قرمز ایجاد می‌نماید، و (ب) کنترل اتلاف آب از طریق تقلیل گشودگی روزنه‌ها، و هم‌چنین به واسطه پایین آوردن تراکم روزنه‌ای (۳۲).

### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور خلاصه نتایج نشان داد که رابطه کاروتنوئید، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و آنتوسیانین با مقاومت به خشکی رابطه‌ای درجه دو بود، با این‌حال این مواد آلی تفاوت زیادی با هم داشتند. به طوری‌که از لحاظ آماری، اثر مثبت کاتالاز، آنتوسیانین و آسکوربات پراکسیداز در غلظت (فعالیت)‌های کم معنی‌دار نبود (با افزایش غلظت،

### منابع

- Lin, P. H. & Chao, Y. Y. (2021). Different drought-tolerant mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and djulis (*Chenopodium formosanum* Koidz.) based on physiological analysis. *Plants*, 10, 2279-2292.
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F. & Murphy, K. M. (2018). Quinoa abiotic stress responses: a review. *Plants*, 7, 106-117.
- Reguera, M., Conesa, C. M., Gil-Gómez, A., Haros, C. M., Pérez-Casas, M. Á., Briones-Labarca, L., Bolaños, L., Bonilla, I., Álvarez, R. & Pinto K. (2018). The impact of different agroecological conditions on the nutritional composition of quinoa seeds. *Peer Journal*, 19, 1-22.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L. & Martínez, E.A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 2541-2547.
- Soares, A. M. S., Souza, T. F., Jacinto, T. & Machado, O. L. T. (2010). Effect of methyl jasmonate on antioxidative enzyme activities and on the contents of

- ROS and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in *Ricinus communis* leaves. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 22, 151-158.
6. Tabar zad, A., Ayoubi, B., Riasat, M., Moucheshi, A. S. & Pessarakli, M. (2017). Perusing biochemical antioxidant enzymes as selection criteria under drought stress in wheat varieties. *Journal of Plant Nutrition*, 40, 2413-2420.
  7. Hoseini, S. S., Cheniany, M., Lahouti, M. & Ganjeali, A. (2016). Evaluation of resistance to drought stress in seedlings of two lines of triticale (*Triticosecale* × *Wittmack*) with emphasis on some enzymatic and non-enzymatic antioxidants. *Journal of Plant Biology*, 30, 27-42. [In Persian]
  8. Snider, J. L., Oosterhuis, D. M., Skulman, B. W. & Kawakami, E. M. (2009). Heat stress-induced limitations to reproductive success in *Gossypium hirsutum*. *Physiologia Plantarum*, 137, 125-138.
  9. Rahimi, J., Rashidi, V., Shahbazi, H., Moghaddam-Vahed, M. & Khalilvand-Behrouzfar, E. (2021). Evaluation of activity of antioxidant enzymes and grain yield in barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars under salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14, 783-791. [In Persian]
  10. Jabari, F., Ahmadi, A., Poustini, K. & Alizadeh, H. (2016). Relationship between some antioxidant enzymes activities and cell membrane and chlorophyll stability in drought-tolerant and susceptible wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science*, 37, 307-316. [In Persian]
  11. Espanani, S., Majidi, M. M., Alaei, H., Saeidi, G. & Farhadi, F. (2020). Physiological changes in flowering stage due to drought stress in F<sub>4</sub> lines derived from inter-specific hybridization of safflower. *Journal of Plant Process and Function*, 9, 125-147. [In Persian]
  12. Ahmadi, K. & Omid, H. (2019). Evaluation of morphological properties, yield components and catalase enzyme in *Lallemantia royleana* Benth. populations under drought stress. *J. Agric. Ecol.* 2, 757-774. [In Persian]
  13. Soleimani-Fard, A. & Naseri, R. (2020). Evaluation of relationships between grain yield and agro-physiological traits of bread wheat genotypes under rainfed conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13, 701-714. [In Persian]
  14. Mhamdi, A., Queval, G., Chaouch, S., Vanderauwera, S., Breusegem, F. V. & Noctor, G. (2010). Catalase function in plants: a focus on arabidopsis mutants as stress-mimic models. *Journal of Experimental Botany*, 61, 4197-4220.
  15. Pan, Y., Wu, L. J. & Yu, Z. L. (2006). Effect of salt and drought stress on antioxidant enzymes activities and SOD isoenzymes of liquorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch). *Plant Growth Regulation*, 49, 157-165.
  16. Beauchamp, C. & Fridovich, M. (1971). Superoxide dismutase: improved assays and assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44, 276-287.
  17. Mita, S., Murano, N., Akaike, M. & Nakamura, K. (1997). Mutants of *Arabidopsis thaliana* with pleiotropic effects on the expression of the gene for beta-amylase and on the accumulation of anthocyanin that is inducible by sugars. *Plant Journal*, 11, 841-851.
  18. Irigoyen, J. J., Emerich, D. W. & Sanchez-Dias, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago Sativa*) plants. *Plant Physiology*, 84, 55-60.
  19. Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
  20. Hiscox, J. D. & Israelstam, G. F. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, 57, 1332-1334.
  21. Giannopolitis, C. N. and Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59, 309-314.
  22. Nakano, Y. & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology*, 22, 867-880.

23. Havir, E. A. & Mchale, N. A. (1987). Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiology*, 84, 450-455.
24. Sarker, U. & Oba, S. (2018). Catalase, superoxide dismutase and ascorbate-glutathione cycle enzymes confer drought tolerance of *Amaranthus tricolor*. *Scientific Reports*, 8, 1-12.
25. Franco, A. C., Matsubara, S. & Orthen, B. (2007). Photoinhibition, carotenoid composition and the co-regulation of photochemical and non-photochemical quenching in neotropical Savanna trees. *Tree Physiol.* 27: 717-725.
26. Thomas, C. E., Morehouse, L. A. & Aust, S. D. (1985). Ferritin and superoxide-dependent lipid peroxidation. *Journal of Biological Chemistry*, 260, 3275-3280.
27. Poli, Y., Nallamothe, V., Balakrishnan, D., Ramesh, P., Desiraju, S., Mangrauthia, S. K., Voleti, S. R. & Neelamraju, S. (2018). Increased catalase activity and maintenance of photosystem II distinguishes high-yield mutants from low-yield mutants of rice var. Nagina22 under low-phosphorus stress. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1543-1556.
28. Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M. & Vitti, A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 9, 13561-13578.
29. Bharti, K., Pandey, N., Shankhdhar, D., Srivastava, P. C. & Shankhdhar, S. C. (2014). Effect of different zinc levels on activity of superoxide dismutases and acid phosphatases and organic acid exudation on wheat genotypes. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 20, 41-48.
30. Bartwal, A., Mall, R., Lohani, P., Guru, S. K. & Arora, S. (2013). Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 216-232.
31. Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P. & Prasad, S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4056-4075.
32. Cirillo, V., D'Amelia, V., Esposito, M., Amitrano, C., Carillo, P., Carputo, D. & Maggio, A. (2021). Anthocyanins are key regulators of drought stress tolerance in tobacco. *Biology*, 10, 139-151.