University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 15, No. 4, pp. 847-863 (Winter 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2021.4092.1964

Original article

Evaluation of some physiological traits and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) under different irrigation regimes

L. Moradi[1], E. Rohi[2], F. Hosseinpanahi[3*], A. Siosemardeh[4]

1. *Ph.D in crop physiology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Iran*
2. *Ph.D in Agronomy, Agricultural Research Institute of Kurdistan, Sanandaj, Islamic Republic of Iran, Iran*
3. *Ph.D in Crop Physiology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Iran*
4. *Ph.D in Agronomy, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Iran*

Received 23 January 2021; Accepted 28 March 2021

Extended abstract

Introduction

Water deficit is one of the abiotic stresses that has many adverse effects on crop growth and yield. Understanding the mechanisms of the effect of drought stress on the plant plays an important role in managing different irrigation regimes to deal with adverse environmental conditions and improve crop yield management. Quinoa as a nutritious crop has attracted particular attention in recent years. In arid and semi-arid conditions, quinoa can be successfully cultivated in marginal soils, indicating that quinoa is an unpredictable plant. Today, agriculture needs to increase production per unit area, despite the limited water resources. To achieve the best results from the cultivation of each crop, careful and calculated management is required. Irrigation intervals are one of the most critical strategies that can improve water use efficiency.

Materials and methods

An experiment was conducted to investigate the effect of irrigation intervals and amounts on the quinoa's physiological traits and yield at the University of Kurdistan research farm, located in Dehgolan plain. The experiment was arranged in a split-plot scheme based on randomized complete blocks design with three replications. Four irrigation intervals (4, 8, 12, and 16 days) were considered the main factor, and four irrigation levels (100%, 75%, 50%, and 25% of plant water requirement) were considered secondary factors. Giza1 cultivar, which was obtained from the Seed and Plant Improvement Institute, was used for cultivation. Relative water content, membrane stability index, chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, carotenoid, carotenoid/total chlorophyll ratio, biological yield, grain yield, and harvest index were measured.

Results and discussion

The relative water content of quinoa was decreased when the irrigation intervals increased. The highest decrease (13.87%) was observed in the irrigation interval once every 16 days compared to the control. The highest Relative water content was observed in the control treatment, while there were no significant differences between control and 75% water requirement treatments. The smallest (72.74%) and greatest (81.06%) membrane stability index were observed in 25% crop water requirement and

*Corresponding author: Farzad Hosseinpanahi; E-Mail: f.hosseinpanahi@agri.uok.ac.ir

© 2022, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

control treatments. The highest chlorophyll a (10.68 $mg.g^{-1}$ in dry weight), chlorophyll b (3.7 $mg.g^{-1}$ in dry weight), and total chlorophyll (14.38 $mg.g^{-1}$ in dry weight) content were observed in 100% crop water requirement with a 4-days interval, which was not significantly different from a 75% crop water requirement treatment with 4-days interval. The smallest (2.82 $mg.g^{-1}$ in dry weight) and greatest (3.72 $mg.g^{-1}$ in dry weight) carotenoid content were observed in 25% crop water requirement and control treatments. However, there were no significant differences between control and 75% crop water requirement treatment. Increasing the irrigation interval from 4 to 8 days reduced the biological yield and grain yield by 50.80% and 44.84%, respectively. The highest biological yield (4237 $kg.ha^{-1}$) and grain yield (1602.6 $kg.ha^{-1}$) were observed in the control treatment, which was not significantly different with 75% crop water requirement. The lowest (43.94%) and highest (50.78%) harvest index were obtained in the irrigation intervals of 4 and 16 days, respectively. Plants that were irrigated every 4 days at 25% of the plant water requirement had the highest water use efficiency (0.63 $kg\ m^{-3}$). Among irrigation amount treatments, the highest harvest index was observed in 25% water requirement. Increasing the irrigation intervals increased the grain protein content so that the 16-days irrigation interval treatment had the highest protein content, although it was not significantly different from the 12-day irrigation interval. The lowest grain protein content was observed in the control treatment, which was not significantly different with a 75% crop water requirement treatment. Drought stress reduced the relative leaf water content, membrane stability index, chlorophyll content, leaf carotenoids, biological yield, harvest index, and quinoa seed yield.

Conclusion

The results of the present study showed that despite the negative effects of drought stress on some physiological parameters, quinoa plant showed good relative resistance against water shortage, so that by providing just 25% of crop water requirements 812 kg.ha-1 could be achieved, which is considerable compared to many crops. Due to the fact that irrigation by 75% of plant water requirement did not reduce grain yield compared to control conditions, so this treatment can be used to irrigate the plant.

***Keywords*:** Antioxidant, Carotenoid, Chlorophyll, Compatible osmolytes

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2021.4115.1971

مقاله پژوهشی

ارزیابی برخی صفات فیزیولوژیک و عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Wild) تحت تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری

لایق مرادی[۱]، ابراهیم روحی[۲]، فرزاد حسین‌پناهی[۳*]، عادل سی‌وسه‌مرده[۴]

۱. دکترای تخصصی فیزیولوژی گیاهان زراعی گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان
۲. دکترای تخصصی زراعت، استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
۳. دکترای تخصصی فیزیولوژی گیاهان زراعی، استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، عضو هیئت‌علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان
۴. دکترای تخصصی فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، عضو هیئت‌علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آنتی‌اکسیدان
اسمولیت سازگار
کاروتنوئید
کلروفیل

تاریخ دریافت:
۱۳۹۹/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۱/۰۸

تاریخ انتشار:
زمستان ۱۴۰۱
۱۵(۴): ۸۴۷-۸۶۳

چکیده

کمبود آب یکی از انواع تنش‌های غیرزنده است که تأثیرات منفی زیادی روی رشد و عملکرد محصولات زراعی دارد. شناخت سازوکارهای اثر تنش خشکی بر گیاه نقش مهمی در مدیریت رژیم‌های مختلف آبیاری به‌منظور مقابله با شرایط نامساعد محیطی و همچنین بهبود مدیریت عملکرد محصولات زراعی ایفا می‌کند. کینوا به‌عنوان محصولی که دارای ارزش غذایی بالایی است در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. به‌منظور بررسی تأثیر دور و میزان آبیاری بر صفات فیزیولوژیک و عملکرد کینوا آزمایشی در سال ۱۳۹۸ به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان واقع در دهگلان اجرا شد. در این آزمایش چهار دور مختلف آبیاری شامل ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ روز آبیاری به‌عنوان فاکتور اول و چهار سطح آبیاری شامل آبیاری کامل (صد درصد نیاز آبی گیاه)، ۷۵ درصد، ۵۰ درصد و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشا، محتوای کاروتنوئید، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، شاخص برداشت و محتوای پروتئین دانه معنی‌دار شد. همچنین اثرمتقابل دور آبیاری و سطوح آبیاری روی محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارایی مصرف آب عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه معنی‌دار شد. بیش‌ترین عملکرد دانه در دور آبیاری ۴ و ۸ روز یک‌بار به ترتیب میزان ۱۷۹۰/۷ و ۱۷۲۹ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. آبیاری به میزان ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه باعث افت ۲۶ و ۵۶/۴۷ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد گردید. با توجه به اینکه آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه عملکرد دانه را نسبت به شرایط شاهد کاهش نداد لذا می‌توان از این تیمار جهت آبیاری گیاه استفاده نمود.

مقدمه

تأمین مواد غذایی موردنیاز جمعیت جهان با توجه به روند افزایشی آن در کشورهای درحال‌توسعه، یک چالش اساسی محسوب می‌شود. برآورد شده در سال ۲۰۵۰ جمعیت دنیا به ۹/۷ میلیارد نفر خواهد رسید. اگر بخواهیم عرضه غذا را با همین روند حفظ کنیم، با توجه به رشد جمعیت در آینده باید تولید غذا را دو برابر کنیم (Ghorbani et al., 2009; Hall and Richards, 2013). کینوا (*Chenopodiun quinoa* Wild.) از خانواده تاج‌خروس (Amaranthaceae) و زیر خانواده Chenopodiaceae، گیاهی است دولپه و یک‌ساله که دارای دانه‌های ریز و گرد است و معمولاً به‌منظور برداشت محصول دانه کشت می‌شود ولی از برگ‌های جوان آن‌هم به‌عنوان سبزی تازه استفاده می‌گردد. برخی ژنوتیپ‌ها

* نگارنده پاسخگو: فرزاد حسین‌پناهی. پست الکترونیک: f.hosseinpanahi@agri.uok.ac.ir

نیز کاربرد کشت علوفه‌ای دارند (Gangopadhyay et al., 2002).

آب به‌عنوان یکی از فاکتورهای محیطی موردنیاز جهت تولید محصولات زراعی مختلف بسیار حائز اهمیت است. کمبود آب در مراحل مختلف رشد و نمو باعث ایجاد آسیب‌های شدید به گیاهان می‌گردد (Omidbeygi, 2007). آب علاوه بر اینکه ازنظر اکولوژیکی دارای اهمیت است، ازنظر فیزیولوژیکی نیز بسیار مهم است زیرا در بیشتر فرآیندهای داخلی گیاه حضورداشته و تقریباً تمامی فعالیت‌های متابولیکی سلولی گیاهان به وجود آب بستگی دارد (Omidbeygi, 2007; Shahattary and Mansourifar, 2017). با توجه به اینکه آب یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولید در کشاورزی محسوب می‌شود و نظر به اینکه در زیرساخت‌های اقتصادی کشور بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است، بنابراین بیش‌ترین تلفات آب نیز به بخش کشاورزی تعلق دارد. برنامه‌ریزی صحیح آبیاری سبب استفاده بهینه از منابع محدود آب می‌گردد (Senobar et al., 2011). مدیریتی دقیق و حساب‌شده به‌منظور حصول نتیجه مطلوب و قابل‌قبول از کشت هر محصول نیاز است؛ بنابراین فواصل آبیاری یکی از مهم‌ترین استراتژی‌هاست که از این طریق می‌توان کارایی مصرف آب را بهبود بخشید (Howell, 2001).

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد کینوا یک گیاه متحمل به خشکی است به‌گونه‌ای که توانایی رشد و تولید دانه در مناطقی با میزان بارش سالانه کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر را دارد (Barrientos et al., 2017). در شرایط خشک و نیمه‌خشک کینوا را می‌توان با موفقیت در خاک‌های حاشیه‌ای کشت کرد، این موضوع نشان می‌دهد که کینوا یک گیاه کم‌توقع است (Jacobsen, 2003). مطالعه‌ای که در ایتالیا روی گیاه کینوا تحت شرایط آبیاری زیاد (۳۰۰ تا ۳۶۰ میلی‌متر) و آبیاری محدود (۲۰۰ تا ۲۲۰ میلی‌متر) صورت گرفته نشان داد که عملکرد تحت شرایط آبیاری محدود به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت (Pulvento et al., 2012). فیشر و همکاران (Fischer et al. 2013) نیز در مطالعه‌ای به‌منظور بررسی تأثیر تنش خشکی روی سه ژنوتیپ کینوا، نشان دادند که با کاهش میزان آب در دسترس گیاه از ۹۵ درصد به ۲۰ درصد عملکرد دانه در هر سه ژنوتیپ کاهش یافت. بیشترین افت عملکرد در بین ژنوتیپ‌های موردبررسی در ژنوتیپ Regalona با کاهش ۳۸ درصدی عملکرد دانه در شرایط ۲۰ درصد آب در دسترس نسبت به شرایط ۹۵ درصد آب در دسترس گیاه مشاهده شد. Killi and Haworth (2017) در مطالعه خود روی کینوا نشان دادند که محتوای نسبی آب برگ در گیاهانی که در شرایط تنش خشکی (آبیاری به میزان ۳۰ درصد ظرفیت زراعی) رشد کرده بودند در مقایسه با گیاهان پرورش‌یافته در شرایط شاهد (آبیاری به میزان ۸۰ درصد ظرفیت زراعی) به میزان ۱۷ درصد کمتر بود. نتایج مطالعه دیگری که روی تأثیر کم‌آبیاری بر گیاه کینوا انجام شده است نشان داد که آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با شرایط شاهد (آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی) باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ و کلروفیل برگ شد (Jamali et al., 2018).

کشت کینوا می‌تواند در ایجاد امنیت غذایی و افزایش درآمد تولیدکنندگان بسیار حائز اهمیت باشد. شرایط آب و هوایی کشورمان و بحران موجود در زمینه منابع آبی باعث شده است تا در زمینه سرمایه‌گذاری در صنعت کشاورزی توجه بیشتری به کشت گیاهانی که نیاز آبی کمتری دارند صورت گیرد. با توجه به اینکه گیاه کینوا سازگاری بالایی به شرایط محیطی مختلف دارد و نظر به اینکه به لحاظ تغذیه‌ای نیز بسیار غنی است لذا به‌منظور تعیین دور مناسب آبیاری و نیاز آبی این گیاه جهت جلوگیری از هدر رفت آب لازم است در نقاط مختلف کشور تحقیقات متعددی در زمینه زراعت این گیاه صورت بگیرد. ورود کینوا به الگوی کشت و زراعت کشور و به‌صورت مکمل در کنار سایر محصولات، جای خود را در محصولات کشاورزی کشور باز کند؛ بنابراین این مطالعه با هدف بررسی اثر رژیم‌های مختلف آبیاری روی برخی پارامترهای فیزیولوژیک همانند محتوای کلروفیل، شاخص پایداری غشا سلولی، محتوای نسبی آب برگ و عملکرد گیاه کینوا طراحی و به اجرا درآمد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۸ و در مزرعه پژوهشی دانشگاه کردستان واقع در دهگلان (۴۰ کیلومتری شرق سنندج) که ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۶۶ متر و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۹ دقیقه است، اجرا گردید. قبل از کاشت به‌منظور تعیین خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک از قسمت‌های مختلف مزرعه و از عمق ۶۰-۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام گردید (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج تجزیه خاک محل اجرای آزمایش (صفر تا ۶۰ سانتی‌متر).

Table 1. Soil analysis of experimental site (0-60 cm).

شن	سیلت	رس	کربن آلی	هدایت الکتریکی	اسیدیته	نیتروژن	پتاسیم	فسفر
Sand	**Silt**	**Clay**	**OC**	**EC**	**pH**	**N**	**K**	**P**
---------- % ----------				$ds\ m^{-1}$		%	---------- ppm ----------	
15.6	30	54.4	0.92	0.49	7.6	0.09	349.1	8

شرایط آب و هوایی محل اجرای طرح در جدول شماره ۲ آمده است. این آزمایش به‌صورت اسپلیت‌پلات در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش چهار دور مختلف آبیاری شامل ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ روز آبیاری به‌عنوان فاکتور اول و ۴ سطح آبیاری شامل آبیاری کامل (صد درصد نیاز آبی گیاه)، ۷۵ درصد، ۵۰ درصد و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. آبیاری اول (خاک‌آب) و دو آبیاری سبک (جهت جلوگیری از سله بستن خاک) برای کل مزرعه به‌صورت یکسان انجام شد و اعمال تیمارهای مختلف آبیاری پس از اطمینان از استقرار کامل بوته‌ها در مزرعه صورت گرفت. رقم مورداستفاده Giza 1 از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج دریافت گردید. ابتدا زمین در بهار ۱۳۹۸ توسط گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد. در ادامه به‌منظور خرد کردن کلوخه‌ها از دیسک استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون خاک مقدار ۷۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل (۴۶ درصد) قبل از کاشت و میزان ۱۵۰ کیلوگرم اوره (۴۶ درصد) در طول فصل رشد (۵۰ کیلوگرم قبل از کاشت و ۱۰۰ کیلوگرم در زمان رشد رویشی (مرحله ۵ برگی) گیاه به‌صورت سرک) مصرف شد. علف‌های هرز مزرعه در طول فصل رشد به‌صورت دستی کنترل گردید و جهت مبارزه با آفت سنک کلزا (*Nysius cymoides*) که شیوع آن در منطقه رایج بود، یک مرحله مبارزه شیمیایی توسط حشره‌کش ایمیداکلوپراید (کنفیدور) به میزان ۳۰۰ سی‌سی در هکتار صورت گرفت.

جدول ۲. آمار هواشناسی محل اجرای آزمایش طی آزمایش (سال ۱۳۹۸).

Table 2. Weather statistics during the experiment (2019).

		اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
		April	**May**	**June**	**July**	**August**
Minimum temperature (°C)	**متوسط حداکثر دما**	19.53	28.70	34.14	34.54	30.30
Maximum temperature (°C)	**متوسط حداقل دما**	7.06	14.46	18.85	19.4	15.43
Precipitation (mm)	**میزان بارش (میلی‌متر)**	16.43	0.44	0	0.03	0
Minimum RH (%)	**حداقل رطوبت نسبی (٪)**	30.8	18.16	15.28	14.26	14.71
Maximum RH (%)	**حداکثر رطوبت نسبی (٪)**	68.5	45.13	35.42	35.00	40.39

ابعاد کرت‌های اصلی ۵×۱۴/۵ و ابعاد کرت‌های فرعی ۵×۲/۵ متر بود و هر کرت فرعی شامل شش خط کاشت به طول ۵ متر و با فاصله ردیف ۵۰ سانتی‌متر قرار داده شد. فاصله روی ردیف‌های کاشت ۱۰ سانتی‌متر (تراکم ۲۰ بوته در مترمربع) در نظر گرفته شد. فاصله بین کرت‌های اصلی و تکرارها ۲ متر و فاصله بین کرت‌های فرعی ۱/۵ متر قرار داده شد. عملیات کاشت در تاریخ ۱۸ اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۸ و به‌صورت دستی و به روش کپه‌ای و آبیاری به‌صورت قطره‌ای (با استفاده از نوار تیپ) با نصب کنتوری با دقت یک لیتر انجام شد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روش پنمن مونتیث پیشنهادی فائو محاسبه شد و نیاز آبی گیاه از ضرب تبخیروتعرق مرجع در ضرایب گیاهی به دست آمد (Carvalho et al., 2013). در مرحله گلدهی (تاریخ ۲۸ تیرماه سال ۱۳۹۸) نمونه‌برداری از واحدهای آزمایشی و با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای در هر کرت از برگ‌های سبز بالغ انجام گرفت و بلافاصله نمونه‌ها در داخل تانک ازت مایع قرارگرفته و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های فریز شده، در یخچال فریزر ۴۰- درجه سانتی‌گراد تا زمان انجام

آزمایش‌های بیوشیمیایی نگهداری و صفات زیر اندازه‌گیری شد.

محتوای نسبی آب برگ

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) از روش (Kalapos et al., 1994) استفاده شد و مقدار آن از طریق رابطه (۱) محاسبه شد. در این رابطه RWC، Fw، Dw و Tw به ترتیب عبارت است از محتوای نسبی آب برگ، وزن تازه، وزن خشک و وزن آماس برگ است.

$$RWC(\%) = \frac{F_W - D_W}{T_w - D_w} \times 100 \qquad [۱]$$

شاخص پایداری غشا سلولی

شاخص پایداری غشاء از طریق اندازه‌گیری نشت الکترولیتی به روش (Liu et al., 2005). با اندکی تغییر ارزیابی شد درنهایت با استفاده از رابطه‌ی (۲) پایداری غشای سلولی محاسبه شد. در این رابطه MSI، L1 و L2 به ترتیب عبارت است از شاخص پایداری غشا، نشت اولیه و نشت ثانویه است.

$$MSI(\%) = \left[1 - \frac{L_1}{L_2}\right] \times 100 \qquad [۲]$$

محتوای کاروتنوئید و کلروفیل برگ

برای اندازه‌گیری کلروفیل از روش آرنون (Arnon, 1967) استفاده شد. با استفاده از روابط ۳ تا ۶ محتوای کاروتنوئید و کلروفیل محاسبه شد. در این روابط Chla، Chlb، ChlT، Car، Abs، V و W به ترتیب عبارت است از محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئید برگ و میزان جذب در طول‌موج‌های مختلف، حجم نمونه (میلی‌لیتر) و وزن نمونه (میلی‌گرم) است.

$$\text{Chla} = \frac{[(12.7 \times \text{Abs}_{663}) - (2.69 \times \text{Abs}_{645})] \times V}{W} \qquad [۳]$$

$$\text{Chlb} = \frac{[(22.9 \times \text{Abs}_{645}) - (4.68 \times \text{Ab}_{663})] \times V}{W} \qquad [۴]$$

$$ChlT = Chla + Chlb \qquad [۵]$$

$$\text{ChlT} = \frac{(1000 \times Abs_{470} - 1.82Chla - 85.02Chlb) \times V}{198 \times W} \qquad [۶]$$

درنهایت مقدار کلروفیل برگ با توجه به نسبت وزن خشک به وزن تر برگ به‌صورت غلظت برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک ارائه شد.

عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و شاخص برداشت

برای اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه، در مرحله رسیدگی در تاریخ ۳ شهریورماه سال ۱۳۹۸ و پس از حذف اثر حاشیه، دو مترمربع از هر کرت برداشت شد و عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه تعیین گردید.

کارایی مصرف آب

با توجه به حجم آب مصرفی در تیمارهای مختلف در طی فصل رشد کارایی مصرف آب از طریق رابطه زیر محاسبه شد که در آن WUE، WU، Y به ترتیب کارایی مصرف آب، آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) و عملکرد (کیلوگرم در هکتار) است.

$$WUE = \frac{Y(Kgha^{-1})}{WU(m^3ha^{-1})} \qquad [۷]$$

پروتئین دانه

به‌منظور تعیین محتوای پروتئین دانه، از محتوای نیتروژن اندازه‌گیری شده با روش کجلدال استفاده شد (Liu et al., 2020). در این رابطه P و N به ترتیب عبارت است از محتوای پروتئین و نیتروژن دانه است.

$$GP(\%) = GN(\%) \times 6.25 \qquad [۸]$$

آزمون نرمال بودن داده‌ها قبل از تجزیه واریانس آن‌ها انجام شد و پس از حصول اطمینان از توزیع نرمال داده‌ها، تجزیه واریانس آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام گرفت. از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد به‌منظور مقایسه میانگین داده‌ها استفاده شد. رسم نمودارها نیز به‌وسیله نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد، تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری بر محتوای رطوبت نسبی آب برگ معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آبیاری نشان داد که بیش‌ترین مقدار محتوای رطوبت نسبی از تیمار دور آبیاری با فاصله ۴ روز (۸۱/۴۹ درصد) حاصل شد. با افزایش طول دوره آبیاری از ۴ به ۱۶ روز میزان محتوای نسبی آب برگ در گیاه به میزان ۱۳/۸۷ درصد کاهش یافت. نتایج مقایسه میانگین سطوح مختلف آبیاری نشان داد که تیمارهای

۱۰۰ درصد و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین محتوای نسبی آب برگ را به خود اختصاص دادند اگرچه تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه مشاهده نشد (جدول ۴). به‌طورکلی نتایج نشان داد با افزایش شدت تنش و کاهش رطوبت خاک برگ‌های گیاه رطوبت بیشتری را از دست می‌دهند و درنهایت میزان رطوبت نسبی آب برگ در شرایط تنش کاهش یافت. محتوای نسبی آب برگ معیار مناسبی از میزان آب برگ‌ها است به‌گونه‌ای که با افزایش شدت تنش خشکی مقدار آن کاهش پیدا می‌کند و این امر باعث آسیب به غشای سلولی و درنهایت افزایش نشت الکترولیتی از غشای سلول می‌گردد (Fu et al., 2004; Gonzaslez et al., 2009) در مطالعه خود روی گیاه کینوا کاهش محتوای نسبی آب برگ در تیمار تنش خشکی در مقایسه با گیاهان رشد کرده در شرایط بدون تنش به میزان ۲۷ درصد را گزارش کردند. در مطالعه دیگری که روی گیاه کینوا انجام شده است کاهش شدید محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Ali et al., 2019).

جدول ۳. تجزیه واریانس مقادیر محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشاء سلولی و کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل، کاروتنوئید و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل تحت تأثیر دور آبیاری و نیاز آبی در گیاه کینوا

Table 3. Analysis of variance for relative water content (RWC), membrane stability index, chloropyll (chl) a, chl b, chl total (T), Carotenoid (Car.) and carotenoid/chl affected by irrigation interval and irrigation levels in quinoa.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی	محتوای نسبی آب برگ RWC	شاخص پایداری غشا MSI	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Chl T	کاروتنوئید Car.	نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل Car/ Chl T
تکرار Block	2	61.12^{ns}	6.97^{ns}	0.10^{ns}	0.025^{ns}	0.16^{ns}	0.11^{ns}	0.0004^{ns}
دور آبیاری Irrigation interval (C)	3	440.2**	427.87**	17.04**	0.0166**	32.86**	1.30**	0.0040^{ns}
خطا (a) Error (a)	6	24.01	10.70	0.36	2.58	0.54	0.08	0.0004
سطوح آبیاری Irrigation levels (I)	3	377.84**	158.13**	24.15**	0.027**	45.67**	2.20**	0.0031**
دور×سطوح آبیاری I × C	9	6.85^{ns}	5.98^{ns}	0.48*	3.40*	0.89*	0.16^{ns}	0.0005^{ns}
خطا (b) Error (b)	24	29.14	14.32	0.20	0.026	0.33	0.11	0.0006
ضریب تغییرات CV (%)	-	*7.11*	*4.91*	*5.51*	*6.00*	*5.33*	*9.95*	*7.63*

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and **: Not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively

شاخص پایداری غشا

تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری بر میزان شاخص پایداری غشا سلولی معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود (جدول ۳).

بین تیمارهای ۴ و ۸ روز فاصله آبیاری به لحاظ پایداری غشا سلولی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی با افزایش فاصله آبیاری به ۱۲ و ۱۶ روز شاخص پایداری غشا کاهش یافت و دور آبیاری ۱۶ روز پایین‌ترین میزان پایداری غشا را به خود اختصاص داد. گیاهانی که در شرایط آبیاری کامل رشد کردند بیش‌ترین میزان پایداری غشا سلولی را داشتند اگرچه با گیاهانی که در شرایط ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه رشد کردند تفاوت معنی‌داری ندا شت. تیمار آبیاری به میزان ۲۵ نیاز آبی گیاه باعث افت ۱۲/۷۹ درصدی پایداری غشا سلول نسبت به شرایط آبیاری کامل شد (جدول ۴). بررسی میزان شاخص پایداری غشا سلولی به‌عنوان شاخصی فیزیولوژیک به‌منظور ارزیابی میزان مقاومت به خشکی، به‌صورت وسیعی کاربرد دارد. تیمار تنش کمبود آب مانع از تکامل غشا شده و

میزان نشت الکترولیت از غشای سلولی تحت تنش افزایش می‌یابد. آسیب‌پذیری غشاء سیتوپلاسمی باعث تراوش محتویات سلول به بیرون می‌گردد، میزان واردشده به غشا را می‌توان از طریق اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی اندازه گرفت. میزان نشت یونی در ارقام متحمل به تنش خشکی نسبت به ارقام حساس کمتر است (Vannozi and Larner, 2007; Nadali et al., 2020) افزایش میزان نشت الکترولیت در کینوا براثر تنش خشکی را گزارش کردند به‌گونه‌ای که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان نشت الکترولیت را به ترتیب در گیاهانی مشاهده کردند که ۱۰۰ و ۵۰ در صد نیاز آبی آن‌ها تأمین شده بود.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر دور آبیاری و نیاز آبی بر محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشا، کاروتنوئید و نسبت کاروتنوئید به کلروفیل در گیاه کینوا

Table 4. Mean comparison effect of irrigation interval and irrigation levels on relative water content (RWC), membrane stability index (MSI), Carotenoid (car) and car/chl in quinoa.

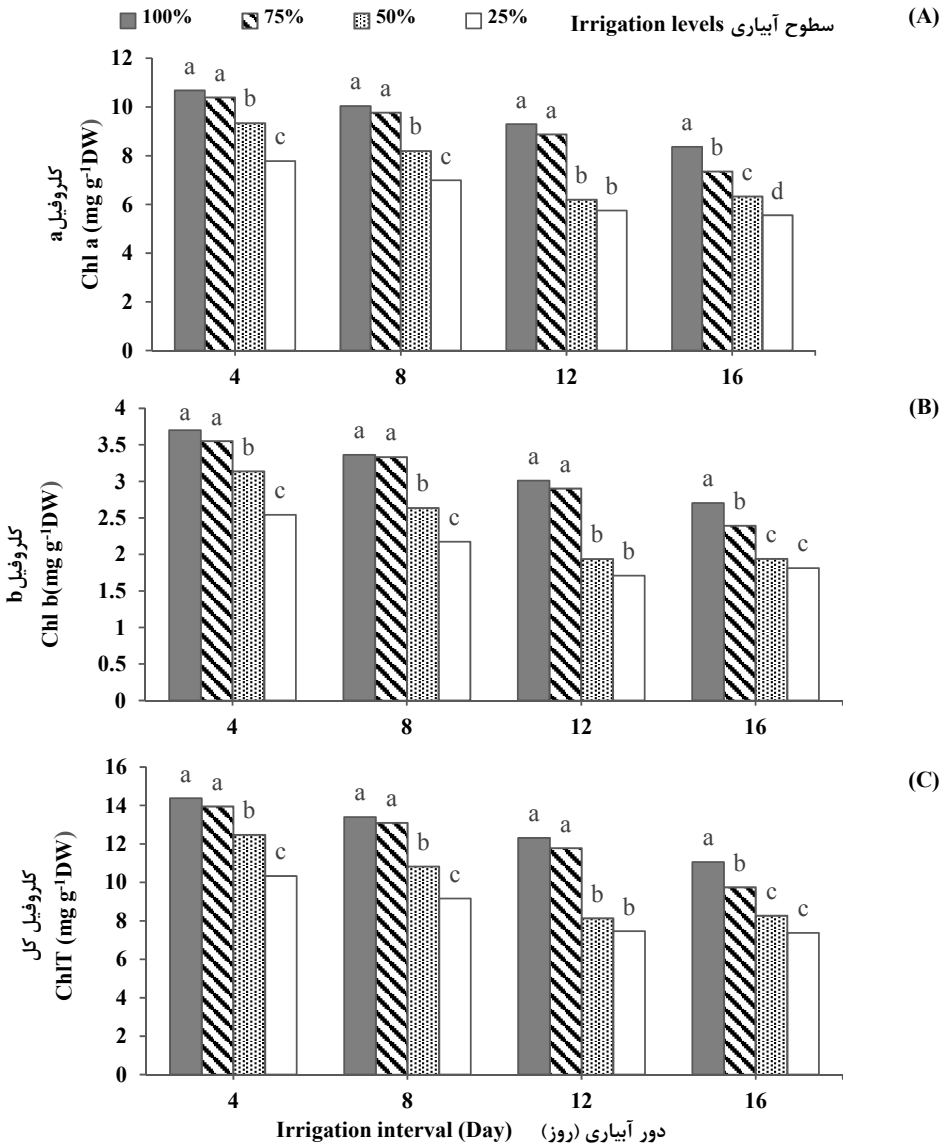
Treatments عامل آزمایشی	محتوای نسبی آب برگ RWC	شاخص پایداری غشا MSI	کاروتنوئید Car	نسبت کاروتنوئید به کلروفیل Car/ Chl T
		(%)	(mg g^{-1}DW)	
Irrigation Interval (Day) **دور آبیاری**				
4	81.49[a]	82.81[a]	3.64[a]	0.287[c]
8	79.10[ab]	80.64[a]	3.54[a]	0.308[b]
12	75.59[bc]	75.32[b]	3.23[b]	0.328[a]
16	67.62[c]	69.44[c]	2.92[c]	0.321[ab]
Irrigatin levels **سطوح آبیاری**				
100%	81.98[a]	81.06[a]	3.72[a]	0.293[d]
75%	78.79[a]	78.75[a]	3.64[a]	0.304[c]
50%	73.85[b]	75.66b[c]	3.14[b]	0.319[b]
25%	69.19[c]	72.74[c]	2.82[c]	0.330[a]

در هر ستون و برای هر واحد آزمایشی، میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Within each column (between two horizontal lines), mean followed by a different letter are significantly different at 5% level (Duncan).

محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ

نتایج آزمایش نشان داد که اثر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی محتوای کلروفیل کل، کلروفیل a و کلروفیل b برگ معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود. همچنین اثر متقابل دور آبیاری و سطوح آبیاری روی این صفات معنی‌دار ($P\leq0.05$) بود (جدول ۳). نتایج برش‌دهی اثرات متقابل نشان می‌دهد سطوح مختلف آبیاری تفاوت معنی‌داری ($P\leq0.05$) را از نظر محتوای کلروفیل کل، کلروفیل a و کلروفیل b برگ در دورهای مختلف آبیاری ایجاد کرده است (جدول ۵). بیش‌ترین محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در تمامی فواصل آبیاری در گیاهانی مشاهده شد که به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی، آبیاری شده بودند؛ اگرچه در فواصل آبیاری ۴، ۸ و ۱۲ روز یک‌بار بین گیاهانی که به‌طور کامل آبیاری شده بودند با گیاهانی که به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی، آبیار شده بودند تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کمترین محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در دور آبیاری ۴ روز یک‌بار به ترتیب به میزان ۷/۷۸، ۲/۵۴ و ۱۰/۳۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ در گیاهانی مشاهده شد که به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی، آبیاری شده بودند. بیش‌ترین محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در دور آبیاری ۱۶ روز یک‌بار به ترتیب به میزان ۸/۳۶، ۲/۷۰ و ۱۱/۰۶ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ در گیاهانی مشاهده شد که به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی، آبیاری شده بودند (شکل ۱).



شکل ۱. برش‌دهی اثرات متقابل: مقایسه میانگین صفات کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در هر سطح نیاز آبی. برای هر دور آبیاری ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Fig. 1. Interaction slicing: Comparison of mean traits of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll at each water requirement level. For each irrigation interval, columns with common letters according to Duncan test are not significantly different at the 5% probability level.

در شرایط تنش خشکی محتویات کلروفیل برگ به دلایلی ازجمله اختلال در فعالیت آنزیم‌های دخیل در سنتز رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، کاهش ساخت رنگیزه‌ها و افزایش تخریب رنگیزه‌ها کاهش پیدا می‌کند. افزایش میزان فعالیت آنزیم کلروفیلاز باعث کاهش محتوای کلروفیل می‌گردد تحت شرایط تنش خشکی بیان این آنزیم القاء می‌شود. از عوامل دیگر دخیل در کاهش محتوای کلروفیل می‌توان افزایش گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از تنش اکسیداتیو به‌عنوان تنش ثانویه اشاره کرد (Yang et al., 2016) در مطالعه خود روی گیاه کینوا کاهش محتویات کلروفیل براثر تنش خشکی را گزارش کردند. نتایج مطالعه‌ای که روی گیاه کینوا صورت گرفته است نشان داد که محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در گیاهان رشد یافته در شرایط تنش خشکی در مقایسه با گیاهانی که در شرایط شاهد پرورش یافتند به

ترتیب به میزان ۱۸/۳۲، ۱۸/۶۷، ۱۸/۴۲ کمتر بود (Elewa et al., 2017). در دیگری که روی گیاه کینوا انجام شده است کاهش محتوای کلروفیل a و کلروفیل b براثر تنش رطوبتی گزارش شده است (Nadali et al., 2020).

جدول ۵. برش‌دهی اثر متقابل: مجموع مربعات سطوح نیاز آبی در هر سطح دور آبیاری برای صفات کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل.

Table 5. Interaction slicing Mean of squares for different irrigation levels at any irrigation interval for chla, chlb and chlT.

دور آبیاری Irrigation Interval	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Chl T
4	10.03^{**}	0.80^{**}	5.13^{**}
8	12.01^{**}	1.00^{**}	6.09^{**}
12	18.35^{**}	1.31^{**}	9.87^{**}
16	7.94^{**}	0.51^{**}	4.46^{**}

ns، * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and **: Not significant, significant at%5 and%1 probability levels, respectively

نتایج حاصل تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی محتوای کاروتنوئید برگ معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود اما برهمکنش آن‌ها روی این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). با افزایش فاصله آبیاری از ۴ به ۸ روز بین گیاهان به لحاظ محتوای کاروتنوئید برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد اما با بیشتر شدن فاصله زمانی آبیاری به ۱۲ و ۱۶ روز میزان کاروتنوئید برگ نیز کاهش یافت به‌گونه‌ای که پایین‌ترین میزان کاروتنوئید برگ در دور آبیاری ۱۶ روز به میزان ۲/۹۲ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک برگ مشاهده شد که نسبت به دور آبیاری ۴ روز ۱۹/۷۸ درصد کمتر بود. کمترین محتوای کاروتنوئید برگ در شرایط آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه بود که نسبت به ۱۰۰ درصد آبیاری به میزان ۲۴/۱۹ درصد محتوای کاروتنوئید کمتری داشت (جدول ۴). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل معنی‌دار ($P\leq0.01$) شد، اما اثر متقابل این دو عامل روی این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۳). با افزایش شدت تنش نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل افزایش یافت. گیاهانی که هر ۴ روز یک‌بار آبیاری شدند، کمترین نسبت کاروتنوئید به کلروفیل را از خود نشان دادند. تأمین نیاز آبی گیاه به‌طور کامل باعث افت چشمگیر نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل در گیاه شد به‌طوری‌که پایین‌ترین نسبت کاروتنوئید به کلروفیل در این شرایط مشاهده شد. بیش‌ترین میزان نسبت کاروتنوئید به کلروفیل کل نیز در گیاهانی مشاهده شد که فقط ۲۵ درصد از نیاز آبی آن‌ها تأمین گردید (جدول ۴). کاروتنوئیدها در فرآیند فتوسنتز به‌عنوان آنتی‌اکسیدانت‌های غیر آنزیمی ضروری هستند. نقش اصلی کاروتنوئید ممانعت از آسیب اکسیداتیو است، کاروتنوئید حفاظت نوری را از طریق فرونشاندن سریع حالت برانگیخته کلروفیل، انجام می‌دهند (Wang et al., 2010; Rodríguez-Pérez et al., 2017). محتوای کاروتنوئید در شرایط تنش همانند کلروفیل برگ دچار کاهش شد هرچند کاهش آن در مقایسه با کلروفیل با شدت کمتری همراه بود. درواقع تحت شرایط تنش نسبت کاروتنوئید به کلروفیل افزایش یافت. به نظر می‌رسد کاهش محتوای کاروتنوئید به دلیل اکسید شدن به‌وسیله گونه‌های فعال اکسیژن و درنتیجه تخریب ساختار آن‌ها است (Wang et al., 2010). الوا و همکاران (Elewa et al. 2017) در مطالعه خود روی گیاه کینوا کاهش میزان کاروتنوئید برگ در گیاهان تحت شرایط تنش خشکی را نسبت به شرایط شاهد مشاهده کردند. در مطالعه دیگری که تأثیر تنش خشکی روی گیاه کینوا بررسی شد، کاهش محتوای کاروتنوئید برگ و افزایش نسبت کاروتنوئید به کلروفیل را براثر تنش خشکی گزارش کردند (Aziz et al., 2018; Rodríguez-Pérez et al., 2017).

عملکرد بیولوژیک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که عملکرد بیولوژیک تحت تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری قرار گرفت

($P\leq0.01$) اما برهمکنش آن‌ها روی این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۶). نتایج نشان داد که فواصل آبیاری ۱۲ و ۱۶ روز یک‌بار به ترتیب باعث کاهش عملکرد بیولوژیک به میزان ۲۹/۸۶ و ۵۰/۸۰ درصد نسبت به فاصله آبیاری هر ۴ روز یک‌بار شدند (جدول ۷). بین سطوح آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه از نظر میزان عملکرد بیولوژیک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. در گیاهان رشد یافته تحت شرایط آبیاری به میزان ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه میزان عملکرد بیولوژیک به‌شدت کاهش یافت به‌گونه‌ای که عملکرد بیولوژیک در سطوح آبیاری ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب به میزان ۲۹/۹۷ و ۶۲/۱۸ کمتر از آبیاری به‌صورت کامل بود (جدول ۷).

جدول ۶. تجزیه واریانس مقادیر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، شاخص برداشت، کارایی مصرف آب و محتوای پروتئین دانه تحت تأثیر دور آبیاری و نیاز آبی در گیاه کینوا

Table 6. Analysis of variance for biological yield (BY), yield, harvest index (HI), water use efficiency and grain protein content (GPC) affected by irrigation interval and irrigation levels in quinoa.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد بیولوژیک BY	عملکرد Yield	شاخص برداشت HI	کارایی مصرف آب WUE: عملکرد بیولوژیک BY	کارایی مصرف آب WUE: عملکرد Yield	محتوای پروتئین دانه GPC
تکرار Block	2	61574.7^{ns}	6031.9^{ns}	38.62**	0.005^{ns}	0.0002^{ns}	0.81^{ns}
دور آبیاری Irrigation interval (C)	3	10760483.4**	1664527.4**	95.75**	0.761**	0.1306**	3.12*
خطا (a) Error (a)	6	94408.3	24654.6	1.96	0.005	0.0017	0.40
سطوح آبیاری (I) Irrigation levels	3	18120668.1**	2825005.0**	155.13**	0.189**	0.0740**	2.08*
دور×سطوح آبیاری I × C	9	108465.1^{ns}	9418.8^{ns}	8.24^{ns}	0.054**	0.0142**	0.34^{ns}
خطا (b) Error (b)	24	151381.4	19023.1	5.73	0.007	0.0013	0.56
ضریب تغییرات (٪) CV (%)		*12.04*	*9.41*	*5.09*	*11.48*	*10.28*	*4.63*

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and **: Not significant, significant at%5 and%1 probability levels, respectively.

تنش خشکی باعث کاهش رشد و سرعت توسعه ریشه و در ادامه کاهش میزان جذب آب و عناصر غذایی، کاهش سطح فتوسنتزی گیاه و سرعت رشد گیاه، کوتاه شدن طول دوره رشد گیاه و کاهش ارتفاع گیاه می‌شود که این اثرات منفی درنهایت میزان تولید ماده خشک کمتر در گیاهان تحت تنش را کاهش می‌دهد (Pessarkli, 1999). ازجمله سازوکارهایی که گیاهان برای مقابله با خشکی نشان می‌دهند شامل از دست دادن آب محدود از طریق بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها، افزایش جذب آب با سیستم‌های ریشه‌ای قوی و عمیق و استفاده کارآمد از آن، برگ‌های کوچک‌تر و شاداب برای کاهش تلفات تعرق و تنظیم اسمزی و پایین نگه‌داشتن پتانسیل آب گیاه به‌واسطه تجمع اسمولیت‌های سازگار است. مکانیسم بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها و کوچک‌تر شدن برگ‌ها درنهایت باعث کاهش فتوسنتز می‌گردد. همچنین سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و عمیق‌تر به‌منظور جذب آب بیشتر نیازمند تخصیص مواد فتوسنتزی به ریشه است که این مسئله سبب تقلیل سهم بخش هوایی از مواد فتوسنتزی و درنهایت کاهش رشد است (Asch et al., 2005; Farooq et al., 2009). بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها و کاهش CO_2 در دسترس گیاه بسیار حائز اهمیت است زیرا کاهش CO_2 در دسترس می‌تواند باعث آسیب‌های شدید نوری گردد (Cornic and Massacc, 1996).

عملکرد دانه

نتایج نشان داد عملکرد دانه تحت تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری قرار گرفت ($P\leq0.01$) اما برهمکنش این عوامل روی عملکرد اثرگذار نبود (جدول ۶). با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد دانه کاهش یافت. افزایش فاصله آبیاری از ۴ به ۸ روز تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه نداشت، اما افزایش فاصله زمانی بین آبیاری به ۱۲ و ۱۶ روز باعث افت چشمگیر عملکرد دانه شد و گیاهان که هر ۱۶ روز یک‌بار آبیاری شده بودند پایین‌ترین میزان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند. فواصل آبیاری ۱۲ و ۱۶ روز یک‌بار در مقایسه با دور آبیاری ۴ روز یک‌بار به ترتیب به میزان ۲۴/۴۴ و ۴۴/۸۴ درصد عملکرد کمتری داشتند (جدول ۷). گیاهانی که به‌طور کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) آبیاری شدند بیش‌ترین عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند هرچند با گیاهانی که به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی آبیاری شده بودند در یک گروه آماری قرار گرفتند. آبیاری گیاه به میزان ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه باعث افت عملکرد دانه گیاه شد و به ترتیب عملکرد دانه را ۳۰/۰۰ و ۵۶/۴۷ کاهش داد (جدول ۷).

جدول ۷. مقایسه میانگین اثر دور آبیاری و نیاز آبی بر عملکرد بیولوژیک، عملکرد، شاخص برداشت و میزان پروتئین دانه کل در کینوا

Table 7. Mean comparison effect of irrigation interval and irrigation levels on biological yield (BY), yield, harvest index (HI) and grain protein content (GPC) in quinoa.

Treatments عامل آزمایشی	عملکرد بیولوژیک BY	عملکرد Yield	شاخص برداشت HI	پروتئین دانه GPC
	----------Kg ha^{-1}----------		----------%----------	
Irrigation Interval (Day) دور آبیاری (روز)				
4	4127.9^{a}	1790.7^{a}	43.94^{c}	15.59^{c}
8	3831.8^{a}	1729.0^{a}	46.46^{b}	15.75^{bc}
12	2939.6^{b}	1353.1^{b}	47.09^{b}	16.32^{ab}
16	2031.1^{c}	987.7^{c}	50.78^{a}	16.70^{a}
Irrigatin levels سطوح آبیاری				
100%	4237.0^{a}	1866.5^{a}	44.57^{c}	15.59^{b}
75%	4123.7^{a}	1800.1^{a}	44.04^{c}	15.91^{ab}
50%	2967.1^{b}	1381.3^{b}	47.81^{b}	16.51^{a}
25%	1602.6^{c}	812.53^{c}	51.85^{a}	16.34^{a}

در هر ستون برای هر واحد آزمایشی، میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Within each column (between two horizontal lines), mean followed by a different letter are significantly different at 5% level (Duncan).

عملکرد محصولات زراعی تحت تأثیر فاکتورهای زراعی و عوامل محیطی همچون میزان آب در دسترس قرار می‌گیرد (Daryanto et al., 2017). تنش خشکی باعث کاهش اندازه برگ، گسترش ساقه و تکثیر ریشه، ایجاد اختلال در روابط آبی گیاهان و کاهش کارایی مصرف آب می‌شود (Farooq et al., 2009; Daryanto et al., 2017). تنش خشکی از طریق فعال کردن تنفس نوری و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن به ماکرومولکول‌های موجد در گیاه آسیب می‌رساند. آسیب ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن یکی از بازدارنده‌های رشد در گیاهان است (Farooq et al., 2009; Nakabayashi et al., 2014). در شرایط تنش خشکی گیاه میزان تخصیص مواد فتوسنتزی به ریشه را به‌منظور جذب آب بیشتر افزایش می‌دهد (Asch et al., 2005). تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش عملکرد گیاهان به‌طور قابل‌توجهی گردد. کاهش ۸۱-۷۹ درصدی عملکرد ذرت و ۴۰ درصدی عملکرد گندم دوروم در مطالعات گزارش شده است (Farooq et al., 2009; Daryanto et al., 2017). درواقع تنش کمبود آب از طریق کاهش محتوای نسبی آب برگ، میزان پایداری غشا سلول و محتوای کلروفیل میزان باعث کاهش عملکرد می‌گردد.

شاخص برداشت

تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی شاخص برداشت گیاه کینوا معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود اما اثر متقابل این دو عامل روی شاخص برداشت معنی‌دار نبود (جدول ۶). افزایش فاصله آبیاری از ۴ به ۱۶ روز یک‌بار شاخص برداشت را افزایش داد، به‌گونه‌ای که کمترین و بیشترین مقدار شاخص برداشت به ترتیب در گیاهانی که با فاصله ۴ و ۱۶ روز یک‌بار آبیاری شده بودند و به میزان ۴۳/۹۴ و ۵۰/۷۸ درصد مشاهده شد (جدول ۷). همچنین گیاهان رشد یافته تحت شرایط آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی بیشترین شاخص برداشت به میزان ۵۱/۸۵ درصد را داشت. شاخص برداشت در گیاهانی که به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی، آبیاری شده بودند نیز از گیاهانی که به میزان ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی، آبیاری شده بودند بیشتر بود. (جدول ۷). در مطالعه حاضر با کاهش آب در دسترس گیاه (افزایش فاصله زمانی بین آبیاری و کاهش میزان آب آبیاری) شاخص برداشت افزایش یافت (Zhang et al., 1998) اظهار داشتند افزایش میزان انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای در اندام های رویشی تحت شرایط تنش کمبود آب می‌تواند باعث افزایش شاخص برداشت در این گیاهان شود. شاخص برداشت درواقع کارایی توزیع و انتقال مواد فتوسنتزی ساخته‌شده، بین اندام‌های مختلف در گیاه به‌ویژه اندام‌های اقتصادی است. (Wnuk et al., 2013). تنش خشکی یکی از عوامل محدودکننده رشد و توسعه گیاه است که نه‌تنها باعث کاهش ماده خشک تولیدی در گیاه می‌شود بلکه باعث اختلال در تسهیم مواد فتوسنتزی به مخازن اقتصادی (دانه) در محصولات زراعی می‌گردد (Wnuk et al., 2013). منابع پر شدن دانه در محصولات دانه‌ای فتوسنتز جاری (که مواد فتوسنتزی مستقیماً به دانه انتقال پیدا می‌کنند) و انتقال مجدد مواد فتوسنتزی ذخیره‌شده در اندام‌های رویشی است (Ma et al., 2015).

کارایی مصرف آب

تأثیر دور آبیاری، سطوح آبیاری و اثر متقابل آن‌ها روی میزان کارایی مصرف آب عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود (جدول ۶). نتایج برش‌دهی اثرات متقابل برای کارایی مصرف آب نشان داد که فقط در دور آبیاری ۱۶ روز یک‌بار بین سطوح مختلف تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۸). کمترین کارایی مصرف آب عملکرد بیولوژیک در فواصل آبیاری ۴، ۸ و ۱۲ روز یک‌بار به ترتیب به میزان ۰/۶۸، ۰/۶۸ و ۰/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب در گیاهانی مشاهده شد که به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی، آبیاری شدند، اگرچه بین گیاهانی که به‌طور کامل آبیاری شده بودند و گیاهانی که فقط به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی آبیاری شدند در دور آبیاری ۱۲ روز یک‌بار از نظر کارایی مصرف آب عملکرد بیولوژیک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کمترین کارایی مصرف آب عملکرد دانه در فواصل آبیاری ۴، ۸ و ۱۲ روز یک‌بار به ترتیب به میزان ۰/۳۰، ۰/۲۹ و ۰/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب در گیاهانی مشاهده شد که به‌طور کامل آبیاری شده بودند (شکل ۲).

نتایج مطالعه‌ای که روی گیاه کینوا انجام شده است نشان می‌دهد کارایی مصرف آب در تیمارهای دیم (۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب) و کم‌آبیاری (۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بیشتر از کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری به‌صورت کامل (۰/۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب) بوده است (Geerts et al., 2008).

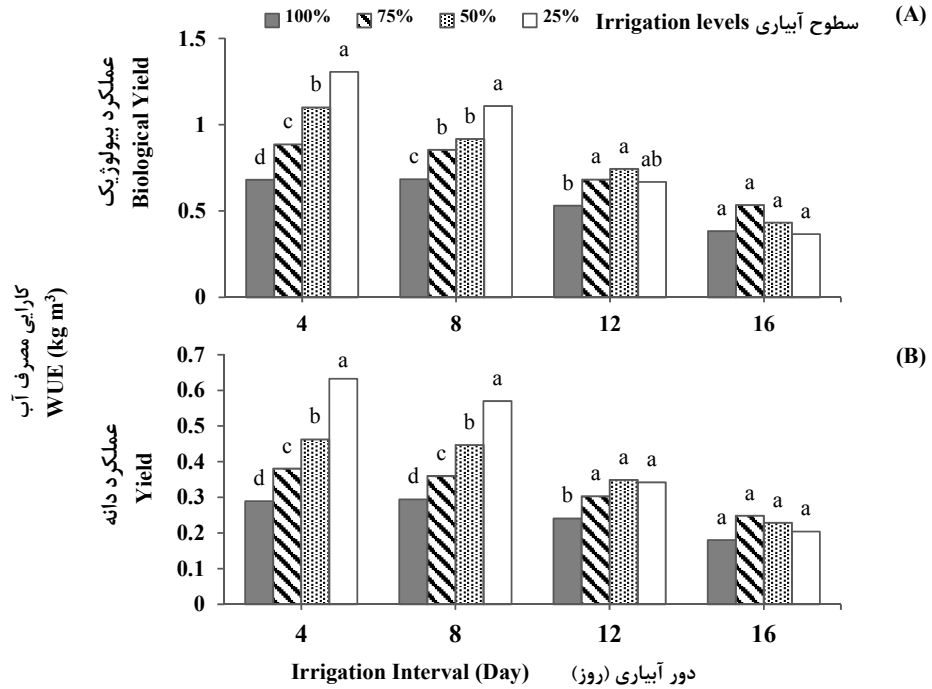
جدول ۸. برش‌دهی اثر متقابل: مجموع مربعات سطوح نیاز آبی در هر سطح دور آبیاری برای کارایی مصرف آب

Table 8. Interaction slicing: Mean of squares for different irrigation levels at any irrigation interval for water use efficiency.

دور آبیاری Irrigation Interval	کارایی مصرف آب WUE	
	عملکرد بیولوژیک BY	عملکرد Yield
4	0.217^{**}	0.064^{**}
8	0.092^{**}	0.043^{**}
12	0.024^{*}	0.007^{**}
16	0.17^{ns}	0.003^{ns}

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

ns, * and **: Not significant, significant at %5 and %1 probability levels, respectively



شکل ۲. برش‌دهی اثرات متقابل: مقایسه میانگین صفات کارایی مصرف آب عملکرد بیولوژیک (و عملکرد دانه در هر سطح نیاز آبی. برای هر دور آبیاری ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Fig. 2. Interaction slicing: Comparison of mean traits of biological yield and yield water use efficiency at each water requirement level. For each irrigation interval, columns with common letters according to Duncan test are not significantly different at the 5% probability level.

پروتئین دانه

تأثیر دور آبیاری و سطوح آبیاری روی میزان پروتئین دانه معنی‌دار ($P\leq0.01$) بود اما برهمکنش آن‌ها روی این صفت اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۵). بیش‌ترین میزان پروتئین دانه در دور آبیاری ۱۶ روز یک‌بار مشاهده شد که با میزان پروتئین دانه در دور آبیاری ۱۲ روز تفاوت معنی‌داری نداشت. میزان پروتئین دانه در گیاهانی که آبیاری آن‌ها به‌صورت کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) انجام گرفت پایین‌ترین مقدار بود اگرچه با گیاهانی که به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی آبیاری شده بودند تفاوت معنی‌داری نداشتند. گیاهانی که آبیاری آن‌ها به میزان ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی انجام‌گرفته بودند از نظر درصد پروتئین دانه در یک گروه آماری قرار گرفتند (جدول ۶).

تنش خشکی به‌طورمعمول باعث کاهش کربوهیدرات دانه (نشاسته و ساکارز) و افزایش محتوای پروتئین دانه می‌گردد (Rakszegi et al., 2019). در شرایط تنش خشکی انتقال مواد فتوسنتزی به دانه کاهش پیدا می‌کند که این امر باعث می‌شود نسبت آندوسپرم نشاسته‌ای دانه به‌کل دانه کاهش یابد و با توجه به نسبت پروتئین در پوسته و جنین در مقایسه با آندوسپرم نشاسته‌ای بیشتر است درنتیجه محتوای پروتئین دانه تحت شرایط تنش کمبود آب افزایش پیدا می‌کند (Daniel and Triboi, 2008). نتایج مطالعات نشان می‌دهد میزان پروتئین دانه به میزان بالایی به پیشینه ژنتیکی و مسائل زیست‌محیطی به‌ویژه تنش خشکی و تنش گرمایی در طول دوره پر شدن دانه بستگی دارد (Farooq et al., 2017). در مطالعه هویا و همکاران (Hevia et al. 1998) روی گیاه کینوا، افزایش میزان پروتئین دانه و کاهش عملکرد در گیاهان در معرض تنش خشکی گزارش شد. در شرایط تنش خشکی میزان جذب دی‌اکسید کربن و تثبیت آن به دلیل بسته شدن نسبی روزنه‌ها و یا کاهش میزان باز بودن آن‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ درنتیجه میزان کل مواد فتوسنتزی جهت پر شدن دانه کاهش می‌یابد این در حالی است که تنش خشکی میزان انتقال مجدد نیتروژن از اندام‌های رویشی به سمت دانه را کاهش نمی‌دهد که این امر باعث افزایش

پروتئین دانه می‌گردد (Stikic et al., 2012; Rakszegi et al., 2019). استیکیچ و همکاران (Stikic et al. 2012) نیز در مطالعه خود مقادیر متفاوت پروتئین دانه در گیاه کینوا را مشاهده کردند آن‌ها اظهار داشتند میزان پروتئین دانه در گیاهان در معرض تنش در مرحله گلدهی و پر شدن دانه، بین ۱۴ تا ۱۸ درصد متغیر بود.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج نشان داد که دورهای مختلف آبیاری و سطوح آبیاری تأثیر متفاوتی روی صفت‌های موردمطالعه گذاشت. افزایش طول دوره آبیاری و کاهش آب در دسترس گیاه باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشا، محتوای کاروتنوئید برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه شد. کمبود آب در دسترس محتوای رنگ‌دانه‌های گیاه را تحت تأثیر قرارداد و باعث کاهش محتوای کلروفیل a و b و کلروفیل کل و کاروتنوئید شد اما نسبت کاروتنوئید به و محتوای پروتئین دانه را افزایش داد. درمجموع اگرچه از نظر شاخص‌های فیزیولوژیکی اثرات منفی تنش خشکی در گیاه کینوا مشاهده شد، اما نتایج حاکی از مقاومت نسبتاً خوب این گیاه نسبت به شرایط خشکی کشور دارد، به‌گونه‌ای که با تأمین ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه می‌توان حدود ۸۱۲ کیلوگرم محصول کینوا تولید کرد که نسبت به بسیاری از گیاهان زراعی کنونی قابل‌توجه است.

منابع

Ali, O. I., Fghire, R., Anaya, F., Benlhabib, O., Wahbi, S., 2019. Physiological and morphological responses of two Quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought stress. Gesunde Pflanzen, 71, 123-133.

Arnon, A.N., 1967. Method of extraction of chlorophyll in the plants. Agronomy Journal. 23, 112-121.

Asch, F., Dingkuhn, M., Sow, A., Audebert, A., 2005. Drought-induced changes in rooting patterns and assimilate partitioning between root and shoot in upland Rice. Field Crops Research. 93, 223-236.

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

Barrientos, E., Carevic, F., Delatorre, J., 2017. The sustainability of the southern highlands of Bolivia and its relationship with the expansion of quinoa growing areas. IDESIA. 35, 7-15.

Carvalho, L.G.D., Evangelista, A.W.P., Oliveira, K.M.G., Silva, B.M., Alves, M.D.C., Júnior, S., Miranda, W.L., 2013. FAO Penman-Monteith equation for reference evapotranspiration from missing data. IDESIA (Chile). 31, 39-47.

Cornic, G., Massacci, A., 1996. Leaf photosynthesis under drought stress. In: Baker, N.R. (ed.), Photosynthesis and the Environment. Advances in Photosynthesis and Respiration, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9_14

Daniel, C., Triboi, E., 2008. Changes in Wheat protein aggregation during grain development, effects of temperature and water stress. European Journal of Agronomy, 16, 1-12.

Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.A., 2017. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production, a review. Agricultural Water Management. 179, 18-33.

Elewa, T.A., Sadak, M.S., Dawood, M.G., 2017. Improving drought tolerance of quinoa plant by foliar treatment of trehalose. Agricultural Engineering International, CIGR Journal. 19 (Special Issue), 245-254.

Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S.S., Siddique, K.H.M., 2017. Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. Journal of Agronomy and Crop Science. 203, 81-102.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development. 29, 185-212.

Fischer, S., Wilckens, R., Jara, J., Aranda, M., 2013. Variation in antioxidant capacity of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Will) subjected to drought stress. Industrial Crops and Products. 46, 341-349.

Fu, J., Fry, J., Huang, B., 2004. Minimum water requirements of four turfgrasses in the transition zone. Horticultural Science. 39, 1740-1744.

Gangopadhyay, G., Das, S., Mukherjee, K.K., 2002. Speciation in chenopodium in west Bengal, India. Genetic Resources and Crop Evolution. 49, 503–510.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Taboada, C., 2008. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). European Journal of Agronomy. 28, 427-436.

Ghorbani, S., Khiabani, B.N., Amini, I., Ardakani, M.R., Pirdashti, H., Moakhar, S.R., 2009. Effect of iron and zinc on yield and yield components of mutant line's wheat. Asian Journal of Biological Sciences. 2, 74-80.

Gonzalez, J.A., Gallardo, M., Hilal, M., Rosa, M., Prado, F.E., 2009. Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and waterlogging stresses, dry matter partitioning. Botanical Studies. 50, 35-42.

Hall, A.J., Richards, R.A., 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. Field Crops Research. 143, 18–33.

Hevia, F., Berti, M., Wilckens, R., Serri, H., Pino, A., 1998. Contenido de proteínas, saponinasy algunas características delalmidón en semillas de quinoa sembradas endiferentes fechasy localidades. Agro-Ciencia. 14, 293 –302.

Howell, T.A., 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. Agronomy Journal. 93, 281-289.

Jacobsen, S.E., 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Food Reviews International. 19, 167-177.

Jamali, S., Sharifan, H., Sajadi, F., 2018. The effect of different seawater and deficit irrigation regimes on leaf properties of quinoa. Water and Irrigation Management, 8, 177-191. [In Persian with English summary].

Kalapos, T., 1994. Leaf water potential, leaf water deficit relationship for ten species of semiarid grassland community. Plant and Soil. 160, 105 –112.

Killi, D., Haworth, M., 2017. Diffusive and metabolic constraints to photosynthesis in quinoa during drought and salt stress. Plants. 6, 49.

Liu, H.P., Yu, B.J., Zhang, W.H., Liu, Y.L., 2005. Effect of osmotic stress on the activity of Ht ATPase and the levels of covalently and non-covalenty conjugated polyamines in plasma membrance preparation from wheat seeding roots. Plant Sciences. 168, 1599-1607.

Ma, S.C., Duan, A.W., Wang, R., Guan, Z.M., Yang, S.J., Ma, S.T., Shao, Y., 2015. Root-sourced signal and photosynthetic traits, dry matter accumulation and remobilization, and yield stability in winter Wheat as affected by regulated deficit irrigation. Agricultural Water Management. 148, 123-129.

Nadali, F., Asghari, H.R., Abbasdokht, H., Dorostkar, V., Bagheri, M., 2020. Improved Quinoa growth, physiological response, and yield by hydropriming under drought stress conditions. Gesunde Pflanzen. 73, 53-66.

Nakabayashi, R., Yonekura-Sakakibara, K., Urano, K., Suzuki, M., Yamada, Y., Nishizawa, T., Michael, A.J., 2014. Enhancement of oxidative and drought tolerance in Arabidopsis by overaccumulation of antioxidant flavonoids. The Plant Journal. 77, 367-379.

Omidbeygi, R., 2007. Production and Processing of Medicinal Plants. 2. Astane Qhodse Razavi Publications, Mashhad, Iran. [In Persian].

Pessarkli, M., 1999. Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker. New York Inc. 697p.

Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., Iafelice, G., Marconi, E., d'Andria, R., 2012. Yield and quality characteristics of quinoa grown in open field under different saline and non-saline irrigation regimes. Journal of Agronomy and Crop Science. 198, 254-263.

Rakszegi, M., Darkó,É., Lovegrove, A., Molnár, I., Láng, L., Bedő, Z., Shewry, P., 2019. Drought stress affects the protein and dietary fiber content of whole meal Wheat flour in wheat/Aegilops addition lines. Plos One. 14, e0211892.

Rodríguez-Pérez, L., Ñústez L, C.E., Moreno, F.L.P., 2017. Drought stress affects physiological parameters but not tuber yield in three Andean Potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars. Agronomía Colombiana. 35, 158-170.

Senobar, A., Tabatabayi, S.A., Dehghani, F., 2011. Effect of irrigation intervals on grain yield, yield components and harvest index of bread wheat cultivars in Yazd region. Environmental Stresses in Crop Sciences. 3, 95-104. [In Persian with English summary].

Shahattary, F.S., Mansoorifar, C., 2017. The effect of drought stress on morphological and physiological traits and essence percentage of medicinal plant (*Nigelle sativa* L.). Bioscience and Biotechnology Research Communications. 11, 298-305.

Stikic, R., Glamoclija, D., Demin, M., Vucelic-Radovic, B., Jovanovic, Z., Milojkovic-Opsenica, D., Milovanovic, M., 2012. Agronomical and nutritional evaluation of quinoa seeds (*Chenopodium quin*oa Willd.) as an ingredient in bread formulations. Journal of Cereal Science. 55, 132-138.

Vannozi, G., Larner, F., 2007. Proline accumulation during drought rhizogene in maise. Journal of Plant Physiology. 85, 441-467.

Wang, G.P., Zhang, X.Y., Li, F., Luo, Y., Wang, W., 2010. Over accumulation of glycine betaine enhances tolerance to drought and heat stress in wheat leaves in the protection of photosynthesis. Photosynthetica. 48, 117-126.

Wnuk, A., Górny, A.G., Bocianowski, J., Kozak, M., 2013. Visualizing harvest index in crops. Communications in Biometry and Crop Science, 8, 48-59.

Yang, A., Akhtar, S.S., Amjad, M., Iqbal, S., Jacobsen, S.E., 2016. Growth and physiological responses of quinoa to drought and temperature stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 202, 445-453.

Zhang, J., Sui, X., Li, B., Su, B., Li, J., Zhou, D., 1998. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. Field Crops Research. 59, 91-98.