



The Effect of Different Irrigation Regimes on Yield and Water Use Efficiency of 10 Quinoa Genotypes in Karaj Region

Azam Jamshidizadeh ¹ | Ali Ahmadi ² | Mahmoud Bagheri ³

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jamshidizadeh@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ahmadi@ut.ac.ir
3. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran. E-mail: m-bagheri@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: May 22, 2025

Revised: July 03, 2025

Accepted: July 07, 2025

Extended Abstract

Introduction. Drought is a global challenge and one of the most significant environmental stresses affecting agricultural productivity. To optimize water resource use in agriculture, cultivating drought-resistant species is crucial, as it directly affects food and water security. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), a member of the Amaranthaceae family, is among the most nutritious grain crops (Ruiz *et al.*, 2014). Due to its high nutritional value (Fuentes & Paredes Gonzales, 2013) and tolerance to adverse environmental conditions (Vega Gálvez *et al.*, 2010), quinoa has been identified as a promising alternative to traditional cereals. While initial studies have explored the performance and adaptability of various quinoa genotypes in the country, limited information is available on the optimal soil moisture levels for maximizing yield and water use efficiency (WUE) for these genotypes.

Materials and Methods. This study was conducted during the 2020–2021 cropping season at the research farm of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. The objective was to determine the optimal soil moisture levels for achieving maximum yield and water use efficiency across different quinoa genotypes. Sowing was done in mid-August under dry tillage conditions. Seeds were sown at a depth of 1–2 cm, and the first irrigation was applied immediately after planting. Each subplot consisted of three 3-meter rows, spaced 50 cm apart, with 10 cm between plants. The experiment followed a split-plot design within a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main plots consisted of four irrigation treatments based on cumulative pan evaporation levels: 90 mm (control), 110 mm, 130 mm, and 150 mm. The subplots contained ten quinoa genotypes: Titicaca, Giza1, Atlas, Blanka, Kancolla, Marangani, Q1, Q3, Q12, and Q29. Measured traits included grain yield, thousand-grain weight, biological yield, harvest index (HI), plant height, inflorescence length, dry weight of plant and inflorescence, and water use efficiency. Drought-sensitive and drought-tolerant genotypes were identified based on the yield reduction under stress compared to the control (YP - YS) as Hossain *et al.* (1990). Data analysis, including ANOVA and mean comparisons was conducted using SAS software version 4.9.

Results and Discussion. The interaction between irrigation level and genotype significantly affected all measured traits. The greatest yield reductions under the 150 mm moisture level were observed in the Atlas, Blanka, and Kancolla genotypes, with decreases of 68%, 68%, and 67%, respectively, categorizing them as drought-sensitive. Among these, Atlas showed the highest yield reduction even at the 130 mm level, identifying it as the most drought-sensitive genotype. Conversely, Q1 and Marangani exhibited the lowest yield reductions under water stress, and if "confirmed in long-term studies", they can be classified as drought-tolerant genotypes. Atlas also performed poorly across all growth parameters under both normal and drought conditions. In terms of plant height under control conditions, Kancolla, Marangani, and Q3 genotypes exhibited the greatest values. The highest dry weights of both plant and inflorescence, as well as the maximum thousand-grain weight, were recorded for Kancolla under control conditions. The highest harvest index values were observed in Titicaca (47.74%) and Giza1 (45.87%) at the 90 mm level, while Atlas and Blanka had the lowest HI values under both control and severe water deficit conditions. Regarding water use efficiency, the Q1, Q12, Q29, Giza1, and Marangani genotypes exhibited the highest WUE values at the 150 mm moisture level. These findings are consistent with previous studies reporting that drought stress during the reproductive stage reduced grain yield and its components (Geerts *et al.*, 2008; Gámez *et al.*, 2019; Farooq *et al.*, 2009). In this study, grain yield variations were primarily attributed to changes in inflorescence dry weight and thousand-grain weight.

Conclusions. Overall, the results demonstrated that quinoa growth, yield, and water use efficiency are significantly influenced by soil moisture levels. Under control conditions (90 mm), Kancolla, Titicaca, Q12, and Giza1 genotypes showed the highest grain yields. Atlas exhibited the highest yield reduction (68%) and was the least productive genotype across all conditions. Q1 was identified as the most drought-tolerant genotype, with minimal yield reduction and the highest WUE (2.20 kgm⁻³) under the 150 mm treatment. Optimal balance between yield and WUE was achieved in Kancolla at 90 mm, Titicaca at 110 mm, and Q1 at both 130 mm and 150 mm. The improved WUE was observed in quinoa under drought stress confirms its strong adaptability to adverse environmental conditions. Efficient management of irrigation in quinoa cultivation can serve as a strategic approach to mitigate water scarcity while maintaining agricultural productivity.

Keywords:

Harvest index,
pan evaporation,
quinoa,
WUE,
yield ranking.

Cite this article: Jamshidizadeh, A., Ahmadi, A., & Bagheri, M. (2025). The effect of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of 10 quinoa genotypes in Karaj region. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(4), 75-91. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.395547.655140.





انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ده ژنوتیپ کینوا در منطقه کرج

اعظم جمشیدی زاده^۱ | علی احمدی^۲ | محمود باقری^۳

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jamshidizadeh@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ahmadia@ut.ac.ir
۳. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، کرج، ایران. رایانامه: m-bagheri@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶ کلیدواژه‌ها: تشتک تبخیر، رتبه‌بندی عملکرد، شاخص برداشت، کارایی مصرف آب، کینوا.	در راستای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در کشاورزی، استفاده از گونه‌های مقاوم به کم‌آبی اهمیت زیادی دارد که بر امنیت غذایی و آبی ایران مؤثر است. مطالعه حاضر با هدف تعیین سطح مطلوب رطوبتی خاک جهت حصول حداکثر عملکرد با راندمان مصرف آبی بهینه در تعدادی از ژنوتیپ‌های کینوا، در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، در مزرعه تحقیقاتی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل چهار رژیم رطوبتی (۹۰ (شاهد)، ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی) به عنوان کرت اصلی و کرت فرعی شامل ده ژنوتیپ کینوا (Blanka, Atlas, Giza1, Titicaca, Kancolla, Marangani, Q1, Q3, Q12, Q29) بود. برهمکنش رطوبت و ژنوتیپ بر تمامی صفات مورد مطالعه معنی‌دار شد. در شرایط نرمال آبیاری ژنوتیپ‌های Kancolla, Titicaca, Q12 و Giza1 عملکرد دانه بیشتری داشتند. درحالی‌که ژنوتیپ Atlas با بیشترین کاهش عملکرد (۶۸ درصد) در پایین‌ترین رتبه قرار گرفت. Q1 با کمترین درصد کاهش عملکرد، برترین ژنوتیپ در شرایط کم‌آبی انتخاب شد و بهترین سطح رطوبتی برای این ژنوتیپ با بالاترین کارایی مصرف آب (۲/۲۰ کیلوگرم در مترمکعب) تیمار ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر بود. نتایج نشان داد که تعادل مناسب بین عملکرد مطلوب و میزان کارایی مصرف آب بهینه، در ژنوتیپ Kancolla در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر، در ژنوتیپ Titicaca در سطح رطوبتی ۱۱۰ میلی‌متر، و در ژنوتیپ Q1 در سطوح رطوبتی ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر حاصل شد.

استناد: جمشیدی زاده، ا.، احمدی، ع.، و باقری، م. (۱۴۰۴). تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ده ژنوتیپ کینوا در منطقه کرج. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۶(۴)، ۷۵-۹۱. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.395547.655140



© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

خشکی یک چالش جهانی و از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که تولید گیاهان زراعی را در دنیا تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش عملکرد محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان از جمله ایران می‌شود. فائو گزارش کرده است که ۹۰ درصد از کل سطح اراضی ایران با متوسط بارندگی ۲۴۰ میلی‌متر در نواحی خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و در دهه‌های اخیر وسعت این زمین‌ها به علت فعالیت‌های گسترده بیابان‌زایی به شدت رو به افزایش بوده است (Behling et al., 2022). تنش خشکی می‌تواند بر تمام جنبه‌های رشد و نمو گیاه تأثیر بگذارد و باعث کاهش رشد و عملکرد گیاه شود. تنش خشکی سبب اختلالات جدی فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی از قبیل کاهش رشد، کاهش آماس سلولی، کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش سرعت فتوسنتز و آسیب به اجزای سلولی می‌شود (Liang et al., 2013).

باتوجه به تأثیر شگرف کمبود آب بر فعالیت‌های کشاورزی، بهترین راهکار برای تداوم و پایداری فعالیت‌های کشاورزی در آینده استفاده علمی از آب و به‌کارگیری راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف این نهاده است. معرفی و توسعه گیاهان جدید سازگار به تنش خشکی و نیز شناسایی فرایندهای فیزیولوژیک مرتبط با سازگاری به خشکی گیاهان و ارتقای آن در گیاهان زراعی بومی از دیگر راهکارهای کارآمد جهت مقابله با عوارض تنش خشکی خواهد بود. در معرفی گیاه جدید باید به درجه تطابق آن با محیط توجه نمود و محدودیت‌های احتمالی که گیاه با آن مواجه می‌گردد را شناخت و در جهت مرتفع‌نمودن آنها اقدام کرد (Geerts et al., 2008).

یکی از گیاهان مورد مطالعه، بر اساس شواهد و اطلاعات موجود که برای شرایط خشکی مناسب به نظر می‌رسد، گیاه کینوا می‌باشد. در سال ۲۰۱۳، فائو برخی ارقام این گیاه را به هشت کشور از جمله ایران ارسال کرد و نتایج ارزیابی‌های اولیه نشان داد که این گیاه در شرایط اقلیمی ایران عملکرد قابل قبولی دارد. کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) از خانواده Amaranthaceae یکی از مغذی‌ترین گیاهان دانه‌ای بوده (Ruiz et al., 2014) که به دلیل ارزش غذایی بالا (Fuentes & Paredes Gonzales, 2013) و همچنین تحمل به شرایط نامساعد محیطی، به عنوان اصلی‌ترین منبع جایگزین غلات معرفی شده است (Vega Gálvez et al., 2010). کینوا گیاهی یکساله، سه‌کرنه و شورزی اختیاری است که به‌عنوان شبه‌غلات معرفی می‌شود. این گیاه بومی مناطق آمریکای جنوبی است که سازگاری گسترده‌ای دارد (Bazile et al., 2015). کینوا دارای ریشه عمیق بوده و مقاومت بالایی در برابر تنش خشکی (Jacobson et al., 2012) از خود نشان می‌دهد و به‌خوبی قابلیت رشد در مناطق خشک و نیمه‌خشک را دارد (Elewa et al., 2017).

لذا باتوجه به اهمیت کینوا در تغذیه انسان، تأمین امنیت غذایی و همچنین مقاومت بالای آن به شرایط نامساعد محیطی، انجام پژوهش‌هایی روی سازگاری و قابلیت کشت گیاه کینوا در داخل ایران ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه مطالعات اولیه در مورد عملکرد و سازگاری ژنوتیپ‌های این گیاه در ایران انجام شده، ولی داده‌ها در خصوص تعیین سطح رطوبتی مطلوب خاک برای هر ژنوتیپ به‌نحوی که همچنان با حفظ کارایی مصرف آب^۱ بالا حداکثر عملکرد حاصل شود، برای ژنوتیپ‌های مورد پژوهش در ایران اندک است.

دانه‌شیری در گیاه کینوا حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی پس از گلدهی است؛ بنابراین، اعمال ۵۰ درصد از کل نیاز آبی در این مراحل رشدی می‌تواند عملکرد کینوا را تا دو تن در هکتار تثبیت کند (Geerts et al., 2008). کاشت زود هنگام با استفاده از ارقام با دوره رشد کوتاه، راهبرد دیگری برای مقابله با کمبود آب و فرار از گرما در هنگام گلدهی و پر شدن دانه است. طی ارزیابی‌های اخیر، Titicaca و ICBA-Q5، دو رقم زودرس، سازگاری خوبی با شرایط مراکش نشان دادند. Titicaca و ICBA Q5 را می‌توان در منطقه Rehamna به‌ترتیب تا ۱/۹ و ۳/۹ تن در هکتار با ۲۰۰ میلی‌متر تولید کرد (Rafik et al., 2021). در پژوهشی دیگر که به‌منظور بررسی اثر کم‌آبیاری روی گیاه کینوا در کشور بزرگ برزیل اجرا شد، نتایج نشان داد که کم‌آبیاری به میزان ۵۰ درصد باعث کاهش ارتفاع بوته، وزن خشک ساقه و برگ و سنبله و وزن دانه شد (Jayme-Oliveira et al., 2017).

نتایج پژوهشی در منطقه گرگان نشان داد که وزن هزار دانه، ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی و ریشه و عملکرد دانه در گیاه کینوا (رقم Titicaca) تحت سطوح مختلف رطوبتی کاهش می‌یابد؛ همچنین ایشان اظهار داشتند که با در نظر گرفتن محدودیت آب در منطقه و عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارهای ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در عملکرد دانه، می‌توان در این منطقه گیاه کینوا را با ۷۵ درصد نیاز آبی آبیاری کرد (Jamali, 2017). در بررسی عملکرد ۱۳ ژنوتیپ کینوا در منطقه کرج Bagheri et al. (2020) بیان کردند، ژنوتیپ EQ101 با متوسط عملکرد ۲۳۳۱/۴۸ کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد را به همراه داشت؛ در صورتی که رقم Marangani با متوسط عملکرد ۷۹۶/۷۸ کیلوگرم در هکتار پایین‌ترین مقدار عملکرد را دارا بود. در تحقیقی روی ژنوتیپ Giza1 در شرایط کشت گلخانه‌ای، تیمار آبیاری بخشی ریشه متناوب و کم‌آبیاری به میزان ۵۰ درصد ظرفیت زراعی منجر به افزایش کارایی مصرف آب به ترتیب به میزان ۳۸/۳ و ۲۳/۸ درصد در مقایسه با تیمار آبیاری کامل شد (Jamali & Ansari, 2021).

در پژوهشی گلخانه‌ای در ایران، عملکرد و بهره‌وری آب کینوا، تحت اثر عمق آب زیرزمینی و کم‌آبیاری بررسی شد. نتایج بیانگر آن بود که بهره‌وری آب کینوا با کم‌آبیاری افزایش می‌یابد (Talebnejad & Sepaskhah, 2015). همچنین آزمایشی مزرعه‌ای در ایران و لایسیمتری در دانمارک روی رشد و عملکرد کینوا تحت رژیم‌های آبیاری کامل (۹۵ درصد ظرفیت زراعی) و کم‌آبیاری (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) در انواع مختلف بافت خاک شامل خاک‌های شنی، شنی‌لومی و لومی‌شنی انجام شد. نتایج نشان داد که اعمال کم‌آبیاری بدون تاثیر بر عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری کامل موجب افزایش معنی‌دار بهره‌وری آب شد (Razzaghi et al., 2016).

به‌رغم تحقیقات فراوان و اما پراکنده در ایران، در مطالعات قبلی سطوح رطوبتی مناسب جهت عملکرد بالا با حفظ بهره‌وری آب (کارایی مصرف آب) بررسی نشده و یا فقط به بررسی عملکرد پرداخته شده است و مطالعاتی که در خصوص عملکرد کینوا تحت تنش خشکی انجام شده معمولاً روی ژنوتیپ‌های محدود و اغلب روی ژنوتیپ Titicaca و Giza1 صورت گرفته است. لذا مطالعه حاضر به منظور بررسی عملکرد و برخی ویژگی‌های رشدی طیفی از ارقام زراعی کینوا که سازگاری و پتانسیل رشدی قابل قبولی در منطقه کرج داشته‌اند، تحت سطوح رطوبتی مختلف انجام شد. همچنین در این آزمایش برای هر ژنوتیپ به‌طور جداگانه سطح مطلوب رطوبتی تعیین و در هر سطح رطوبتی، ژنوتیپ‌های با عملکرد برتر و کارایی مصرف آب بالا معرفی شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر ورت آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج (با مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا)، با بافت خاک لومی‌رسی اجرا شد. خصوصیات شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش در جدول ۱ و مشخصات آب و هوایی منطقه آزمایش در سال ۱۴۰۰ در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش.

Table 1. Soil physical and chemical properties of experimental field.

Texture	Available K (mgkg ⁻¹)	Available P (mgkg ⁻¹)	Total N (%)	Organic Carbon (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH
Loamy Clay	145	8.16	0.067	0.58	1.03	7.7

کشت در نیمه دوم مردادماه و به‌صورت خشکه‌کاری انجام شد، کشت بذور در عمق یک تا دو سانتی‌متری خاک انجام و اولین آبیاری بلافاصله پس از کشت صورت گرفت. هر کرت فرعی شامل سه ردیف کشت به طول سه متر با فاصله ۵۰ سانتی‌متر بین ردیف‌های کشت و ۱۰ سانتی‌متر بین بوته‌ها بود و به‌منظور جلوگیری از اختلاط تیمارهای آبیاری دو متر فاصله بین تیمارهای آبیاری ایجاد شد. جهت رسیدن به تراکم مورد نظر، کشت به‌صورت کپه‌ای انجام و پس از ظهور دو برگ

حقیقی، تنک شد و حذف علف‌های هرز به صورت وجین دستی انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل سطوح رطوبتی (۹۰، ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A) به عنوان کرت اصلی و ۱۰ ژنوتیپ کینوا که پتانسیل رشد در اقلیم کرج و اقلیم‌های مشابه را داشته‌اند، به عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. ژنوتیپ‌های مورد آزمایش کینوا (Blanka, Atlas, Giza1, Titicaca, Marangani, Kancolla, Q1, Q3, Q12, Q29) با مشاوره مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج و بر اساس بررسی‌های قبلی انتخاب شد. این ژنوتیپ‌ها از نظر زراعی سازگاری خوبی نشان داده بودند و از لحاظ طول دوره رشد، وزن هزار دانه، تیپ بوته، رنگ گل‌آذین و دانه از تنوع زیادی برخوردار بودند. مشخصات ژنوتیپ‌های مورد آزمایش در جدول ۳ ذکر شده است.

جدول ۲. داده‌های هواشناسی سال زراعی ۱۴۰۰.
Table 2. Meteorological data during 2021-2022.

Months	Max Temp (°C)	Min Temp (°C)	Mean Temp (°C)	Rain (mm)	Evaporation (mm)
23Jul-22Aug 2021	36.1	20.3	28.2	0.1	10.4
23Aug-22Sep 2021	34.2	19.2	26.7	0.0	8.5
23Sep-22Oct 2021	25.5	11.0	18.3	0.0	6.2
23Oct- 21Nov 2021	15.4	5.1	10.2	2.2	3.5
22Nov-21Dec 2021	13.0	2.9	8.0	1.3	0.0
22Dec 2021-20Jan 2022	9.8	0.5	5.2	0.5	0.0

پس از استقرار کامل بوته‌ها در مرحله هشت برگی، تیمار رطوبتی بر اساس تبخیر از تشتک کلاس A تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک اعمال شد. مقدار آب آبیاری در هر مرحله آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه در تیمار شاهد تعیین شد. تعیین نیاز آبی با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد:

$$ET_o = K_p \times E_{pan} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن K_p ضریب تبخیر از تشتک، E_{pan} میزان تبخیر از تشت (میلی‌متر)، K_c ضریب گیاهی، ET_o تبخیر تعرق گیاه مرجع و ET_c تبخیر تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر) می‌باشد (Allen, 1991). مقدار آب برآوردشده برای هر تیمار در هر مرحله از آبیاری با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای تعبیه‌شده در کرت‌ها، در اختیار گیاه قرار گرفت. در انتهای دوره آزمایش، حجم آب آبیاری در شرایط نرمال ۲۳۶۸ مترمکعب در هکتار ثبت شد. افزون بر میزان تبخیر از تشتک تبخیر در تعیین تیمارهای رطوبتی، درصد رطوبت خاک نیز در هر تیمار و پیش از هر بار آبیاری تیمارها، توسط دستگاه TDR اندازه‌گیری شد (جدول ۴).

به منظور اندازه‌گیری ارتفاع گیاه، دو هفته قبل از برداشت تعداد ۱۰ بوته به طور تصادفی از هر واحد آزمایشی انتخاب و به وسیله متر از محل طوقه تا قسمت بالای ساقه اندازه‌گیری شد. پس از رسیدن فیزیولوژیکی گیاه، بوته‌های یک متر مربع از هر واحد آزمایشی برداشت و پس از خشک کردن، صفات عملکرد دانه، عملکرد زیستی و شاخص برداشت (نسبت عملکرد دانه بر عملکرد زیستی ضربدر صد) در آنها اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک بوته و گل‌آذین، ۱۰ بوته به طور تصادفی از هر واحد آزمایشی انتخاب و پس از انتقال اندام هوایی گیاه به آزمایشگاه، با قراردادن نمونه‌ها در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت و سپس با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم تعیین شد (Talebnejad & Sepaskhah, 2015). وزن هزار دانه پس از جداسازی پوشش دانه‌ها محاسبه شد. در هر بار آبیاری، حجم آب مورد استفاده اندازه‌گیری شد. در آخر فصل، از تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم) بر جمع کل مقدار آب مصرف‌شده، میزان کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شد (Stanhill, 1986).

پس از تعیین عملکرد ژنوتیپ‌های مذکور در آزمایش، ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس به تنش، بر اساس تغییر عملکرد در شرایط تنش نسبت به شاهد ($Y_p - Y_s$) انتخاب شد (Hossain *et al.*, 1990). در پایان، تجزیه واریانس و مقایسات میانگین داده‌ها با آزمون دانکن و با کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. عملکرد دانه و کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر عملکرد دانه در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵)، این نتیجه بیانگر آن است که بین ژنوتیپ‌های مختلف کینوا از حیث عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری وجود دارد و هر ژنوتیپ در یک سطح رطوبتی معین، نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برتری داشته است.

مقایسه میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌های مختلف (جدول ۶) نشان داد به‌طور کلی عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با هم متفاوت بود و کاهش سطح رطوبتی باعث کاهش عملکرد شد. تمامی ژنوتیپ‌ها در شرایط شاهد بیشترین میزان عملکرد خود را نشان دادند که به‌نظر می‌رسد این موضوع نشان‌دهنده حساسیت کینوا به تنش آبی، به‌ویژه در مراحل زایشی و پر شدن دانه است. برترین ژنوتیپ در این شرایط، ژنوتیپ Kancolla با عملکردی به مقدار ۴۱۸۴/۴ کیلوگرم در هکتار بود که با ژنوتیپ‌های Giza1 و Q12، Titicaca (به‌ترتیب به مقدار ۳۸۹۹/۵، ۳۶۹۷/۰ و ۳۶۴۸/۶ کیلوگرم در هکتار) از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و این چهار ژنوتیپ بیشترین میزان عملکرد دانه در شرایط شاهد را در بین ده ژنوتیپ مورد آزمایش داشتند (جدول ۶). آخرین رتبه از نظر عملکرد دانه مربوط به ژنوتیپ Atlas با کمترین میزان عملکرد حدود $1762/7 \text{ Kg ha}^{-1}$ بود که اختلاف معنی‌دار بسیار زیادی با میانگین عملکرد سایر ژنوتیپ‌ها از خود نشان داد. کاهش عملکرد تحت کم‌آبایی در این پژوهش با نتایج گزارش‌شده توسط Jamali & Ansari (2021) روی کینوا مطابقت داشت. آنها نیز کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه کینوا تحت شرایط تنش رطوبتی گزارش کردند و آن را به کاهش فتوسنتز، بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش رشد رویشی نسبت دادند. از طرفی، عملکرد برتر ژنوتیپ‌هایی مانند Kancolla و Titicaca می‌تواند ناشی از ویژگی‌هایی نظیر کارایی مصرف آب بیشتر، توسعه بهتر ریشه، توانایی حفظ محتوای نسبی آب برگ یا پایداری فتوسنتز در طی رشد باشد؛ این فرضیه‌ها در مطالعات پیشین نیز مطرح شده‌اند (Gomez-Pando *et al.*, 2019; Ruiz *et al.*, 2014).

باتوجه به درصد کاهش عملکرد محاسبه‌شده در هر سطح رطوبتی (جدول ۷)، کمترین کاهش عملکرد به میزان سه درصد در سطح رطوبتی ۱۱۰ میلی‌متر و مربوط به ژنوتیپ Q1 بود. همچنین این ژنوتیپ در سایر سطوح نیز کاهش عملکرد کمتری نسبت به سایر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نشان داد که به‌نظر می‌رسد به‌دلیل مقاومت به خشکی بالاتر نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها باشد. ژنوتیپ Blanka با ۳۶ درصد کاهش، بیشترین میزان کاهش عملکرد را در سطح رطوبتی ۱۱۰ میلی‌متر نشان داد. همچنین ژنوتیپ Marangani با ۳۵ و ۳۸ درصد کاهش عملکرد دانه به‌ترتیب در سطوح رطوبتی شدید ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر کمترین میزان کاهش عملکرد را نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در سطوح رطوبتی مذکور از خود نشان داد. نتایج این پژوهش با یافته‌های محققان دیگر روی کینوا (Jamali, 2017; Jabawi *et al.*, 2019) مطابقت داشت. تفاوت در پاسخ ژنوتیپ‌ها به سطوح مختلف رطوبت نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت بالایی برخوردار است. شناسایی ژنوتیپ‌های با عملکرد پایدار و کمتر حساس به کاهش رطوبت می‌تواند گامی مؤثر در توسعه کشت کینوا در مناطق با محدودیت آبی باشد.

جدول ۳. مشخصات ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این آزمایش.

Table 3. Characteristics of genotypes examined in this experiment.

مشخصات	ژنوتیپ‌ها									
	Q1	Q3	Q12	Q29	Titicaca	Giza1	Blanka	Atlas	Marangani	Kancolla
زیستگاه	* ICBA	ICBA	Chile	Chile	Denmark	Egypt	Peru	Netherlands	Peru	Peru
دوره رشدی	متوسط‌رس	متوسط‌رس	متوسط‌رس	متوسط‌رس	زودرس	زودرس	متوسط‌رس	متوسط‌رس	دیررس	متوسط‌رس
رنگ بذر	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن	کرم روشن
نوع گل‌آذین	نیمه‌باز	فشرده	نیمه‌باز	باز	فشرده	فشرده	باز	نیمه‌باز	نیمه‌باز	نیمه‌باز
رنگ گل‌آذین قبل از گلدهی	سبز	سبز	سبز	سبز	سبز	سبز	ارغوانی	سبز	سبز	ارغوانی
رنگ گل‌آذین بعد از گلدهی	سبز	خردلی	سبز روشن	خردلی	نارنجی-ارغوانی	نارنجی-بنفش	بنفش	سبز	ارغوانی	ارغوانی
میزان ساپونین	نیمه‌تلخ**	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ	نیمه‌تلخ

* International Center for Biosaline Agriculture (ICBA), UAE

** یک تا ۱۰ میلی‌گرم در گرم (۰/۱ تا ۱ درصد)

جدول ۴. میانگین درصد رطوبت خاک پیش از هر بار آبیاری در رژیم‌های مختلف رطوبتی.

Table 4. Mean soil moisture percentage before irrigation in the moisture regimes.

Moisture regimes	90 mm	110 mm	130 mm	150 mm
Soil moisture percent	11.5	9.6	7.43	5.73

جدول ۵. تجزیه واریانس صفات زراعی ده ژنوتیپ مختلف کینوا تحت رژیم رطوبتی.

Table 5. Analysis of variance of the agronomic traits of ten quinoa genotypes under moisture regimes.

SOV	df	Mean Squares								
		Grain yield	Biological yield	1000-grain weight	Plant height	Spike length	Dry weight plant	Dry weight spike	Harvest index	WUE
Rep	2	437420.8*	1608510.0 ^{ns}	0.004 ^{ns}	28.93 ^{ns}	1.35 ^{ns}	14.57 ^{ns}	0.038 ^{ns}	79.27**	0.187 ^{ns}
Moisture (M) Regimes (R)	3	18711217.8**	80201870.0**	3.32**	7407.80**	358.77**	2408.68**	13.95**	592.81**	0.285**
Error a	6	111030.97 ^{ns}	1089550.0 ^{ns}	0.007 ^{ns}	5.76 ^{ns}	0.436 ^{ns}	14.94 ^{ns}	0.133 ^{ns}	2.38 ^{ns}	0.035 ^{ns}
Genotype (G)	9	3419243.7**	18336350.0**	0.885**	1015.71**	36.39**	171.01**	1.75**	737.42**	1.41**
G× M ×R	27	232047.74**	2558892.2**	0.183**	69.33**	6.94**	50.76**	0.357**	16.62*	0.10*
Error	72	98976.0	733772.2	0.025	15.44	3.01	14.47	0.129	9.09	0.060
CV (%)	-	13.63	11.24	6.09	4.18	9.20	17.53	10.85	10.02	17.40

ns, * و **: به ترتیب غیرمعنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and **: non-significant, significant at the 5 and 1 percent probability levels, respectively.

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی کینوا، بیشترین میزان کاهش عملکرد به ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های Atlas، Blanka و Kancolla در سطح ۱۵۰ میلی‌متر با کاهش ۶۸، ۶۷ و ۶۸ درصد بود که می‌توان این سه ژنوتیپ را در دسته حساس به تنش خشکی معرفی کرد. از آنجایی که ژنوتیپ Atlas در سطح رطوبتی ۱۳۰ نیز کاهش بیشتری در عملکرد دانه نسبت به دو ژنوتیپ حساس مذکور (K و B) نشان داد، بنابراین می‌توان از آن به عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ نسبت به کم‌آبی در بین ده ژنوتیپ مورد آزمایش نام برد (جدول ۷). در مجموع، از نظر عملکرد دانه در شرایط شاهد ژنوتیپ‌های Kancolla، Titicaca، Giza1 و Q12 برتر بودند و با کاهش میزان آبیاری، برتری نسبی ژنوتیپ‌ها تغییر کرد، به طوری که در سطح رطوبتی ۱۱۰ میلی‌متر عملکرد ژنوتیپ Titicaca بر سایر ژنوتیپ‌ها برتری داشت. Q1 برترین ژنوتیپ در سطح ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر برآورد شد و این پایداری عملکرد تحت تنش، می‌تواند نشانه‌ای از تحمل بالای ژنوتیپ Q1 به تنش خشکی باشد.

مطابق با یافته‌های پیشین مانند Ruiz et al. (2014) و Gomez-Pando et al. (2019)، پاسخ متفاوت ژنوتیپ‌های کینوا به کم‌آبیاری معمولاً به ویژگی‌هایی نظیر عمق توسعه ریشه، حفظ محتوای نسبی آب برگ، کارایی مصرف آب (WUE) و مکانیسم‌های تنظیم اسمزی وابسته است. ژنوتیپ‌هایی مانند Q1 احتمالاً دارای برخی از این ویژگی‌ها هستند که امکان عملکرد بهتر تحت شرایط محدودیت آبی را برای آن‌ها فراهم می‌کند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی (مانند Q1 و تا حدی Titicaca) می‌تواند برای کشت در مناطق کم‌آب توصیه شود، درحالی که ژنوتیپ‌هایی نظیر Atlas باید بیشتر در شرایط بدون تنش یا با مدیریت دقیق آبیاری مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۶. مقایسه میانگین برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر عملکرد دانه. حروف انگلیسی بیانگر مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های مختلف از حیث صفت مربوط با استفاده از روش دانکن است. (ترتیب ژنوتیپ‌ها بر حسب بیشترین عملکرد در سطح شاهد می‌باشد).

Table 6. Mean comparison of interaction of moisture regime and genotype on grain yield. The English letters indicate the mean comparison of different genotypes in terms of the relevant trait using the Duncan method. (The order of the genotypes is according to the highest yield in the control level.).

Rank	Genotype	Yp (Kgha ⁻¹)	Ys1 (Kgha ⁻¹)	Ys2 (Kgha ⁻¹)	Ys3 (Kgha ⁻¹)
1	Kancolla	4184.4 ^a	2754.8 ^{de}	1956.4 ^{hi}	1355.8 ^{jk}
2	Titicaca	3899.5 ^{ab}	3504.0 ^b	2390.6 ^{fg}	1650.6 ^j
3	Q12	3697.0 ^{ab}	2710.8 ^{de}	2094.3 ^{gh}	1721.1 ^j
4	Giza1	3684.6 ^{ab}	2707.6 ^{de}	2182.8 ^{gh}	1737.5 ^j
5	Q3	3437.0 ^b	2549.8 ^{ef}	1948.3 ^{hi}	1285.8 ^{jk}
6	Q29	3406.8 ^{bc}	2500.6 ^{fg}	2047.6 ^{gh}	1601.3 ^j
7	Q1	3246.0 ^{cd}	3128.2 ^{cd}	2803.0 ^{de}	2093.0 ^{gh}
8	Marangani	2899.2 ^{de}	2096.6 ^{gh}	1872.6 ^{ij}	1773.6 ^j
9	Blanka	2847.6 ^{de}	1819.8 ^{ij}	1422.0 ^{kl}	909.1 ^{kl}
10	Atlas	1762.7 ^j	1306.3 ^{jk}	780.8 ^{kl}	550.0 ^l

علائم اختصاری Yp، Ys1، Ys2 و Ys3 نشان‌دهنده به ترتیب نشان‌دهنده عملکرد در سطح شاهد (۹۰ میلی‌متر)، عملکرد تحت رژیم رطوبتی ۱۱۰ mm،

عملکرد تحت رژیم رطوبتی ۱۳۰ mm و عملکرد تحت رژیم رطوبتی ۱۵۰ mm می‌باشند.

The abbreviations Yp, Ys1, Ys2 and Ys3 indicate, respectively: Grain yield at the control level (90 mm), grain yield under the 110 mm moisture regime, grain yield under the 130 mm moisture regime, and grain yield under the 150 mm moisture regime.

جدول ۷. رتبه‌بندی ده ژنوتیپ کینوا بر حسب میزان درصد کاهش عملکرد دانه در رژیم مختلف رطوبتی.

Table 7. Ranking of ten quinoa genotypes according percent yield reduction under moisture regimes.

Rank	Genotype	Normal	Genotype	Variation (%) - Ys1	Genotype	Variation (%) - Ys2	Genotype	Variation (%) - Ys3
1	Kancolla	-	Q1	3	Q1	13	Q1	35
2	Titicaca	-	Titicaca	10	Marangani	35	Marangani	38
3	Q12	-	Q3	25	Titicaca	38	Giza1	52
4	Giza1	-	Atlas	25	Q29	39	Q29	52
5	Q3	-	Giza1	26	Giza1	40	Q12	53
6	Q29	-	Q29	26	Q3	43	Titicaca	57
7	Q1	-	Q12	26	Q12	43	Q3	62
8	Marangani	-	Marangani	27	Blanka	50	Kancolla	67
9	Blanka	-	Kancolla	34	Kancolla	53	Blanka	68
10	Atlas	-	Blanka	36	Atlas	55	Atlas	68

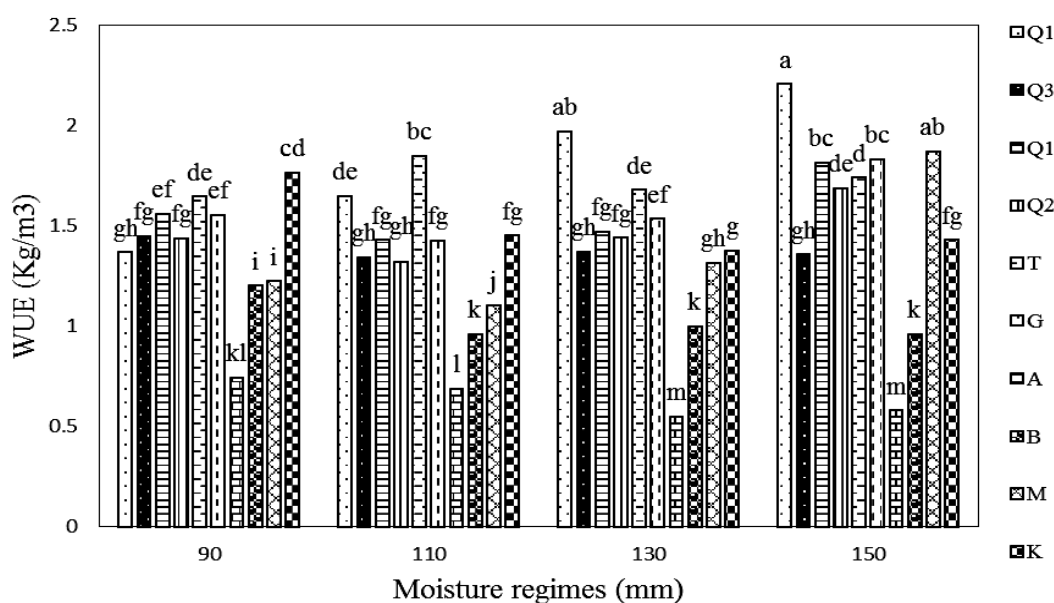
علائم اختصاری Normal، Ys1، Ys2 و Ys3 به ترتیب نشان‌دهنده سطح شاهد (۹۰ میلی‌متر)، کاهش عملکرد تحت سطح رطوبتی ۱۱۰ mm، کاهش

عملکرد تحت سطح رطوبتی ۱۳۰ mm و کاهش عملکرد تحت سطح رطوبتی ۱۵۰ mm می‌باشند.

The abbreviations Normal, Ys1, Ys2 and Ys3 indicate, respectively: control level (90 mm), yield reduction under 110 mm moisture level, yield reduction under 130 mm moisture level and yield reduction under 150 mm moisture level.

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۵) برهمکنش ژنوتیپ و رژیم رطوبتی بر کارایی مصرف آب در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. ژنوتیپ‌ها واکنش متفاوتی به تنش رطوبتی از نظر کارایی مصرف آب نشان دادند؛ به‌طوری‌که بیشترین کارایی مصرف آب در تنش شدید رطوبتی (سطح ۱۵۰ میلی‌متر) در ژنوتیپ‌های Q1، Q12، Q29، Giza1 و Marangani، به ترتیب با میزان ۲/۲۰، ۱/۸۱، ۱/۶۹، ۱/۸۳ و ۱/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شد. با این حال عملکرد این ژنوتیپ‌ها عملکرد پایینی بود که نتایج این پژوهش با نتایج محققان دیگر روی گیاه کینوا (Jamali & Ansari, 2021; Alvar-Beltrán et al., 2019; Jamali, 2017) مطابقت داشت. کمترین راندمان مصرف آب هم در آخرین سطح رطوبتی (۱۵۰ میلی‌متر) و هم در سطح شاهد، مربوط به ژنوتیپ Atlas به ترتیب به مقادیر ۰/۵۸ و ۷۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود (شکل ۱). ژنوتیپ Q1 با افزایش سطح تنش، کارایی مصرف آب افزایش نشان داد، درحالی‌که در ژنوتیپ Q3، کارایی مصرف آب در همه سطوح رطوبتی یکسان بود و بیشترین میزان کارایی مصرف آب مربوط به آن در سطح شاهد (۱/۴۵) حاصل شد که اختلاف جزئی با سایر سطوح رطوبتی داشت (شکل ۱).

در ژنوتیپ Titicaca بهترین کارایی مصرف آب در سطح رطوبتی ۱۱۰ میلی‌متر حاصل شد؛ اما در ژنوتیپ Kancolla، Atlas و Blanka سطح شاهد بهترین سطح رطوبتی بود که همانطور که اشاره شد باتوجه به قرار گرفتن این سه ژنوتیپ در دسته حساس به خشکی این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد. به‌هرحال در اغلب ژنوتیپ‌ها بیشترین کارایی مصرف آب مرتبط به سطح شدید رطوبتی (۱۵۰ mm) بود؛ البته همانگونه که انتخاب سطح رطوبتی مطلوب صرفاً بر اساس عملکرد و بدون توجه به کارایی مصرف آب منطقی به نظر نمی‌رسد، انتخاب بر اساس کارایی مصرف آب به تنهایی نیز مبنای منطقی ندارد. لذا انتخاب سطح رطوبتی مبنی بر تعادلی از Y بالا و کارایی مصرف آب بالا خواهد بود، مفهومی که در بحث مربوط به کشاورزی پایدار در مناطق خشک نیز به آن تأکید شده است (Blum, 2009). بنابراین، باتوجه به تفسیر نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که کارایی مصرف آب بالا همراه با حفظ عملکرد مطلوب، در ژنوتیپ Kancolla در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر، ژنوتیپ Titicaca در سطح ۱۱۰ میلی‌متر، و ژنوتیپ Q1 در سطوح رطوبتی ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر حاصل شد. این یافته‌ها مؤید آن است که احتمالاً ژنوتیپ‌هایی مانند Titicaca و Q1 پتانسیل بالاتری برای کشت در مناطق نیمه‌خشک دارند، زیرا می‌توانند در شرایط محدودیت آبی، تعادل بین عملکرد و کارایی مصرف آب را بهتر حفظ کنند.



شکل ۱. برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر کارایی مصرف آب (ستون‌ها از چپ به راست نشان‌دهنده ژنوتیپ‌ها به ترتیب Q1، Q3، Q12، Q29، Titicaca، Giza1، Atlas، Blanka، Marangani و Kancolla می‌باشد).

Figure 1. Interaction of moisture regime and genotype on WUE. (The columns from left to right represent the genotypes Q1, Q3, Q12, Q29, Titicaca, Giza1, Atlas, Blanka, Marangani, and Kancolla, respectively.)

۳-۲. وزن خشک و ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که رژیم رطوبتی اثر معنی داری روی وزن خشک و ارتفاع بوته ژنوتیپ‌های مختلف کینوا داشت و همچنین برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر میزان وزن خشک و ارتفاع بوته در سطح یک درصد معنی دار شد (جدول ۵). ژنوتیپ‌های Kancolla و Marangani و Q3 از نظر ارتفاع بوته در بین سایر ژنوتیپ‌های آزمایش به ترتیب با مقدار ۱۳۰/۳۳ و ۱۲۴/۶۷ و ۱۲۸/۰ سانتی متر، بالاترین طول بوته را در سطح ۹۰ میلی متر به خود اختصاص دادند و اختلاف معنی داری باهم نداشتند؛ درحالی که در سطح مذکور ژنوتیپ Atlas با میانگین ارتفاع ۱۰۴/۶۷ سانتی متر کمترین طول بوته را به خود اختصاص داد که با ژنوتیپ Blanka با مقدار ارتفاع بوته ۱۰۵/۰ سانتی متر اختلاف معنی داری نداشت (جدول ۸).

در سطوح شدید کم آبی بیشترین میزان کاهش ارتفاع بوته نسبت به شاهد مربوط به ژنوتیپ‌های Atlas با مقدار ۶۳/۳۳ سانتی متر و ژنوتیپ Giza1 با مقدار ۶۷/۳۳ سانتی متر مشاهده شد (جدول ۸). Jamali (2017) بیان کرد که کم آبیاری سبب کاهش ارتفاع بوته در ژنوتیپ Titicaca شد که با نتایج پژوهش حاضر مشابهت داشت. نتایج این پژوهش با نتایج سایر پژوهشگران روی کینوا مطابقت داشت (Jbawi et al., 2018; Alvar-Beltran et al., 2019). افزایش شدت تنش آبی در گیاه منجر به افزایش آبسازیک اسید در گیاه می شود که رشد گیاه را کاهش می دهد (Bahrapour et al., 2019). کاهش در صفت ارتفاع بوته در شرایط تنش آبی (به عنوان یک عامل بازدارنده در رشد) می تواند علاوه بر افزایش میزان آبسازیک اسید، به دلیل کاهش جذب آب و به تبع آن آماس سلولی در بافت های مختلف گیاه و در پی آن کاهش توسعه سلولی و متابولیت های لازم برای تقسیم سلولی در گیاه باشد (Farooq et al., 2009).

بیشترین وزن خشک بوته در شرایط شاهد در ژنوتیپ Kancolla (۴۶/۹۴) و پس از آن در ژنوتیپ Q12 (۴۴/۹۶) بود که از نظر آماری اختلاف معنی داری با هم نداشتند. کمترین میزان وزن خشک بوته در این سطح رطوبتی مربوط به Atlas (۲۴/۵۵) بود. بیشترین کاهش وزن خشک در آخرین سطح رطوبتی (۱۵۰ میلی متر) مربوط به ژنوتیپ های حساس K، B و A بود که با نتایج Yang et al. (2016) روی کینوا مطابقت داشت.

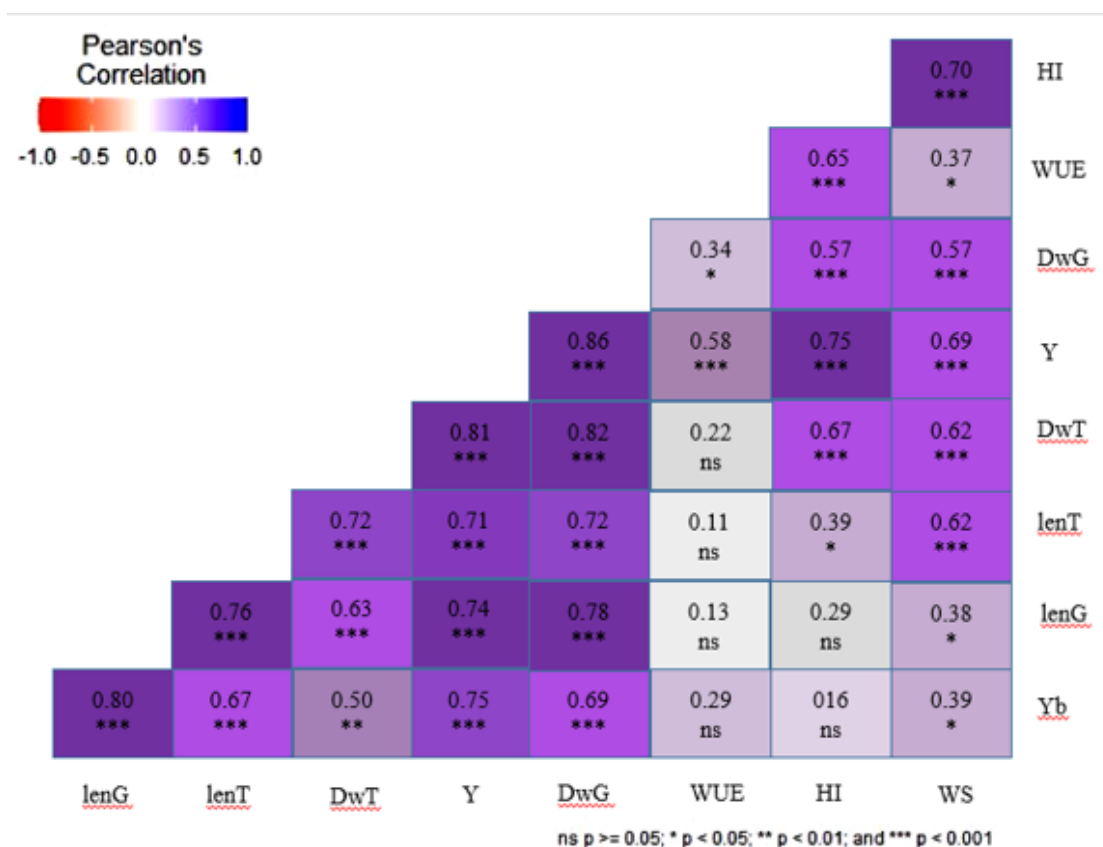
۳-۳. وزن هزار دانه

بر اساس نتایج، برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر وزن هزار دانه معنی دار شد (جدول ۵). به طور کلی با کاهش سطوح آبیاری وزن هزار دانه تمامی ژنوتیپ ها روند کاهشی از خود نشان داد که با یافته های پژوهش Jamali (2017) با موضوع کم-آبیاری در گیاه کینوا روی رقم Titicaca مطابقت داشت. بیشترین وزن هزار دانه (۳/۱۲ گرم) مختص به سطح ۹۰ میلی متر در ژنوتیپ Kancolla بود که بیشترین عملکرد دانه نیز در همین سطح رطوبتی مربوط به این ژنوتیپ بود و همچنین همبستگی مثبت و معنی داری بین عملکرد و وزن هزار دانه آن نشان داده شد ($r^2=69$) که این همبستگی حاکی از تأثیر مثبت وزن هزار دانه بر افزایش عملکرد دانه است (شکل ۲)، به ویژه در شرایطی که تعداد دانه ممکن است به دلیل تنش محدود شود، اما دانه های باقی مانده بزرگ تر و پرتر تشکیل شوند. مشابه این نتیجه در گزارش های پیشین مانند Bhargava et al. (2007) و Bazile et al. (2016) نیز مشاهده شده است که تأکید دارند در شرایط تنش، وزن دانه یکی از عوامل تعیین کننده نهایی عملکرد می باشد. در مقابل کمترین وزن هزار دانه نیز مربوط به ژنوتیپ حساس Blanka و Atlas به ترتیب با مقدار ۱/۳۴ و ۱/۴۳ مشاهده شد که اختلاف معنی داری با هم نداشتند (جدول ۸). این دو ژنوتیپ نه تنها از نظر عملکرد کل دانه ضعیف ظاهر شدند، بلکه ناتوانی آن ها در حفظ اندازه دانه تحت شرایط تنش نیز مشهود بود. چنین رفتاری معمولاً نشان دهنده ضعف در پرشدن دانه در دوره پس از گرده افشانی و همچنین احتمالاً محدودیت در فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی در این ژنوتیپ ها است (Blum, 1996).

۳-۴. طول و وزن خشک گل آذین

طول و وزن خشک گل آذین از عوامل فیزیولوژیکی مؤثر بر عملکرد دانه هستند؛ زیرا به عنوان مخازن ذخیره ای نقش مهمی در تأمین مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای پر شدن دانه ایفا می کنند. بین ژنوتیپ ها از نظر طول گل آذین اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود داشت. همچنین برهمکنش ژنوتیپ و رژیم رطوبتی بر این صفت در سطح یک درصد معنی دار بود. در

شرایط شاهد ژنوتیپ‌های Kancolla و Marangani و Q3 از نظر طول گل‌آذین در بین سایر ژنوتیپ‌های آزمایش به‌ترتیب با مقدار ۲۸/۰ و ۲۷/۵۰ و ۲۷/۶۷ سانتی‌متر، بالاترین طول گل‌آذین را به خود اختصاص دادند؛ درحالی‌که ژنوتیپ Atlas با میانگین طول گل‌آذین ۱۹ سانتی‌متر کمترین طول گل‌آذین را در شرایط شاهد به خود اختصاص داد (جدول ۸) که با نتایج Bagheri *et al.* (2020) مشابهت داشت. همچنین در مطالعه‌ای دیگر توسط Pathan *et al.* (2023) روی کینوا نشان داده شد که طول گل‌آذین در شرایط تنش خشکی کاهش می‌یابد. این کاهش طول گل‌آذین می‌تواند به کاهش تعداد دانه‌ها و در نهایت کاهش عملکرد کلی گیاه منجر شود.



شکل ۲. نقشه حرارتی همبستگی بین صفات زراعی گیاه کینوا تحت رژیم مختلف رطوبتی (علائم اختصاری شامل HI: شاخص برداشت، WUE: کارایی مصرف آب، DwG: وزن خشک گل‌آذین، DwT: وزن خشک کل بوته، lenT: ارتفاع بوته، LenG: طول گل‌آذین، WS: وزن هزار دانه، Y: عملکرد دانه و Yb: عملکرد زیستی می‌باشند).

Figure 2. Heatmap correlation between the agronomic traits of quinoa under moisture regimes. (The abbreviations: HI: Harvest Index, WUE: Water Use Efficiency, DwG: Dry weight Spike, DwT: Dry weight plant, lenT: Plant height, LenG: Spike length, WS: 1000-grain weight, Y: Grain yield and Yb: Biological yield).

طبق نقشه حرارتی همبستگی صفات، طول گل‌آذین همبستگی معنی‌داری با عملکرد دانه ($r=0.74$) نشان داد (شکل ۲). در شرایط کم‌آبی شدید (۱۵۰ mm)، بالاترین طول گل‌آذین مربوط به ژنوتیپ‌های Kancolla و Marangani (۱۷ سانتی‌متر) و کمترین طول گل‌آذین مربوط به ژنوتیپ Atlas (۱۴ سانتی‌متر) بود (جدول ۸). خشکی از طریق تأثیر بر رشد مریستمی و اختلال در تنظیمات هورمونی سبب کاهش طول گل‌آذین می‌شود. از طرفی تنش خشکی، تولید مواد فتوسنتزی (منابع کربنی) کاهش یافته و انتقال آنها به اندام‌های زایشی (مثل سنبله یا گل‌آذین) کم می‌شود که رشد این اندام‌ها را محدود می‌کند (Saini & Westgate, 2000).

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۵) برهمکنش ژنوتیپ و رژیم رطوبتی بر وزن خشک گل‌آذین در سطح یک درصد معنی دار شد. بیشترین وزن خشک گل‌آذین مربوط به Kancolla در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر (۲۹/۵۷ گرم) بود

همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک گل‌آذین و عملکرد دانه ($r=0.86$) وجود داشت که در ژنوتیپ Kancolla این همبستگی به خوبی مشهود بود؛ زیرا بیشترین عملکرد دانه در بین سایر ژنوتیپ‌ها نیز مربوط به این ژنوتیپ بود. کمترین وزن خشک گل‌آذین هم در شرایط شاهد و هم کم‌آبی شدید مربوط به ژنوتیپ Atlas بود (جدول ۸) که با نتایج Yang *et al.* (2016) روی کینوا مشابهت داشت. تنش خشکی باعث بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود که ضمن محدود کردن جذب CO_2 و کاهش کربوهیدرات‌ها و رشد زیستی، منجر به کاهش وزن خشک گیاه می‌شود (Farooq *et al.*, 2009). اعمال تنش خشکی در مرحله زایشی در کینوا می‌تواند منجر به خسارت به اجزای عملکرد دانه و در نهایت عملکرد دانه شود (Geerts *et al.*, 2008; Gámez *et al.*, 2019). به‌طور مشابه، اعمال تنش آبی در طی دوره پر شدن دانه در غلات، منجر به کاهش عملکرد دانه، کاهش تعداد دانه در هر بوته و نیز کاهش وزن دانه می‌شود (Farooq *et al.*, 2009). عملکرد دانه تحت تأثیر اجزای آن از جمله وزن هزار دانه می‌باشد. باتوجه به نتایج، در این بررسی به‌نظر می‌رسد تغییرات در عملکرد دانه حاصل تغییر در وزن خشک سنبله و وزن هزار دانه باشد (جدول ۸).

۳-۵. شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که رژیم رطوبتی اثر معنی‌داری روی شاخص برداشت ژنوتیپ‌های مختلف کینوا داشت و همچنین برهمکنش رژیم رطوبتی و ژنوتیپ بر میزان شاخص برداشت در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). بیشترین مقدار شاخص برداشت مربوط به ژنوتیپ‌های Titicaca و Giza1 به ترتیب حدود ۴۷ و ۴۵ درصد در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر بود. کمترین میزان شاخص برداشت مربوط به ژنوتیپ‌های Atlas و Blanka هم در سطح رطوبتی ۹۰ (شاهد) و هم در تنش شدید (۱۵۰ میلی‌متر) مشاهده شد که این مقادیر در سطح شاهد به ترتیب ۲۴ و ۲۰ درصد و در تنش شدید به ترتیب ۱۴/۲۵ و ۱۵/۹۵ درصد بود که به‌نظر می‌رسد در مورد ژنوتیپ Blanka به دلیل وجود عملکرد زیستی بالا در سطح شاهد می‌باشد (جدول ۸). گزارش شده است که اعمال تنش خشکی در مرحله گلدهی شاخص برداشت کینوا را کاهش می‌دهد (Geerts *et al.*, 2008). کمترین میزان عملکرد زیستی هم در سطح شاهد (۹۰ میلی‌متر)، به میزان ۷۲۰۰ کیلوگرم و هم در آخرین سطح رطوبتی (۱۵۰ میلی‌متر)، به مقدار ۳۸۰۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به ژنوتیپ Atlas بود که پایین بودن شاخص برداشت در این ژنوتیپ باتوجه به میزان عملکرد پایین آن قابل توجیه است. کاهش زیست‌توده با افزایش فاصله آبیاری در گیاهان دیگر از جمله گندم گزارش شده است (Salehi *et al.*, 2019).

از آنجایی که افزایش توان رقابتی سنبله برای جذب مواد فتوسنتزی در مقایسه با ساقه باعث افزایش شاخص برداشت خواهد شد (Reynolds *et al.*, 2009)؛ ژنوتیپ‌های Titicaca و Giza1 ارتفاع بوته کمتری نسبت به ژنوتیپ‌های Kancolla، Q3 و Marangani داشتند و از شاخص برداشت بیشتری هم برخوردار بودند (جدول ۸). تفاوت در ارتفاع گیاهان به عنوان مهمترین علت تنوع در شاخص برداشت عنوان شده است. گزارش شده که کاهش ارتفاع به صورت غیرمستقیم باعث افزایش شاخص برداشت شد بدون اینکه تأثیر معنی‌داری بر عملکرد زیستی داشته باشد (Hay, 1995). شاخص برداشت همبستگی مثبت و معنی‌داری با عملکرد دانه ($r=75$) داشت (شکل ۲). بیشترین عملکرد دانه (۴۱۸۴) ژنوتیپ Kancolla در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر و همچنین بیشترین مقدار عملکرد زیستی (۱۳۲۰۰) آن نیز، در این سطح رطوبتی بود. با وجود عملکرد زیستی بالای ژنوتیپ Blanka (۱۳۶۰۰) در سطح شاهد، میزان عملکرد دانه آن در سطح رطوبتی شاهد (۲۸۴۷/۶) نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها پایین تر بود که این موضوع می‌تواند بیانگر تفاوت در رفتارهای فیزیولوژیکی یا ویژگی‌های رشدی میان ژنوتیپ‌های کینوا حتی در شرایط رشدی یکسان باشد.

جدول ۸. مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ و رژیم رطوبتی بر صفات زراعی ارزیابی شده گیاه کینوا.

Table 8. Mean comparison of Intraction of the genotype and moisture regime on the measured agronomic traits of quinoa.

Genotype	Moisture regimes (mm)	Biological yield (kg/ha ⁻¹)	1000-grain weight (g)	Plant height (cm)	Spike length (cm)	Dry weight plant (g)	Dry weight spike (g)	Harvest index (%)
Kancolla	Control (90)	13200 ^a	3.123 ^a	130.33 ^a	28.00 ^a	46.94 ^a	29.57 ^a	31.66 ^{fg}
	110	9200 ^{cd}	2.776 ^{de}	94.00 ^{gh}	19.67 ^{ef}	19.16 ^{ghi}	16.54 ^c	29.74 ^{fg}
	130	7000 ^{ef}	2.721 ^{de}	90.33 ^{ih}	17.00 ^{hi}	14.75 ^{ijk}	10.35 ^{fg}	28.02 ^{gh}
	150	6000 ^{hi}	1.873 ^h	82.00 ^{jk}	17.00 ^{hi}	10.81 ^l	8.95 ^{gh}	22.59 ⁱ
Titicaca	Control (90)	8200 ^{de}	3.089 ^{ab}	108.00 ^{cd}	25.33 ^{bc}	34.55 ^{bc}	22.94 ^b	47.74 ^a
	110	7600 ^{ef}	2.941 ^{ac}	101.00 ^{ef}	20.67 ^{de}	27.04 ^{ef}	17.53 ^c	46.48 ^a
	130	6400 ^{fg}	2.830 ^{bd}	84.67 ^{ijk}	19.33 ^{ef}	20.36 ^{ghi}	13.85 ^d	37.32 ^{cd}
	150	5200 ^{ij}	2.777 ^{de}	74.67 ^{lm}	16.00 ^{ij}	14.61 ^{ijk}	10.04 ^{fg}	31.73 ^{fg}
Q12	Control (90)	8400 ^{cd}	3.027 ^{ac}	113.00 ^{bc}	21.33 ^d	44.96 ^a	20.10 ^{bc}	43.87 ^{ab}
	110	7400 ^{ef}	2.907 ^{ac}	105.33 ^{ed}	18.33 ^{gh}	36.01 ^b	15.99 ^c	36.60 ^{cd}
	130	6000 ^{hi}	2.853 ^{bd}	97.00 ^{fg}	17.00 ^{hi}	18.30 ^{hij}	9.85 ^{gh}	34.76 ^{de}
	150	6000 ^{hi}	2.397 ^g	84.67 ^{ijk}	15.00 ^{jk}	15.09 ^{ijk}	8.97 ^{gh}	28.57 ^{gh}
Giza1	Control (90)	8160 ^{de}	3.064 ^{ab}	101.00 ^{ef}	20.67 ^{de}	34.32 ^{bc}	19.24 ^c	45.87 ^a
	110	7000 ^{ef}	2.959 ^{ac}	89.67 ^{ih}	18.67 ^{fg}	28.20 ^{de}	12.60 ^{ef}	38.47 ^{cd}
	130	6200 ^{gh}	2.845 ^{bd}	70.00 ^{mn}	16.33 ^{ij}	18.06 ^{hij}	10.19 ^{gh}	35.01 ^{de}
	150	5600 ^{hi}	2.589 ^{fg}	67.33 ^{no}	14.67 ^{jk}	14.65 ^{ijk}	8.48 ^h	30.93 ^{fg}
Q3	Control (90)	10000 ^{bc}	2.963 ^{ac}	128.00 ^a	27.67 ^a	36.16 ^b	20.10 ^c	34.51 ^{ef}
	110	8200 ^{de}	2.758 ^{de}	106.33 ^{ed}	18.67 ^{fg}	21.77 ^{fgh}	15.99 ^{de}	31.25 ^{fg}
	130	8000 ^{ef}	2.700 ^{ef}	100.67 ^{ef}	18.00 ^{gh}	17.92 ^{ij}	9.85 ^{gh}	24.25 ^{hi}
	150	6240 ^{gh}	2.567 ^{fg}	88.67 ^{ih}	15.67 ^{ij}	13.92 ^{jk}	8.97 ^{gh}	21.61 ^{ij}

ادامه جدول ۸. مقایسه میانگین برهمکنش ژنوتیپ و رژیم رطوبتی بر صفات زراعی ارزیابی شده گیاه کینوا.

Continued Table 8. Mean comparison of Intraction of the genotype and moisture regime on the measured agronomic traits of quinoa.

Genotype	Moisture regimes (mm)	Biological yield (kg ha ⁻¹)	1000-grain weight (g)	Plant height (cm)	Spike length (cm)	Dry weight plant (g)	Dry weight spike (g)	Harvest index (%)
Q29	Control (90)	8600 ^{cd}	2.925 ^{ac}	108.00 ^{cd}	19.67 ^{ef}	28.21 ^{de}	15.55 ^{cd}	39.91 ^{bc}
	110	7500 ^{ef}	2.854 ^{bd}	85.67 ^{ijk}	17.00 ^{hi}	24.94 ^{efg}	10.85 ^{de}	33.59 ^{ef}
	130	6600 ^{fg}	2.790 ^{de}	79.67 ^{kl}	16.33 ^{ij}	20.95 ^{fgh}	9.19 ^{gh}	31.37 ^{fg}
	150	5800 ^{hi}	2.447 ^{fg}	70.00 ^m	14.67 ^{jk}	14.15 ^{jk}	7.21 ^{ij}	27.85 ^{gh}
Q1	Control (90)	8600 ^{cd}	2.936 ^{ac}	116.67 ^b	25.00 ^{bc}	29.77 ^{cd}	15.27 ^{cd}	37.78 ^{cd}
	110	8600 ^{cd}	2.797 ^{de}	107.67 ^{cd}	19.33 ^{ef}	21.82 ^{fgh}	13.89 ^{de}	36.35 ^{de}
	130	7800 ^{ef}	2.773 ^{de}	86.67 ^{ij}	16.33 ^{ij}	16.35 ^{ijk}	9.69 ^{gh}	35.93 ^{de}
	150	6000 ^{hi}	2.713 ^{de}	80.00 ^{kl}	14.67 ^{jk}	14.79 ^{jk}	9.51 ^{gh}	34.25 ^{ef}
Marangani	Control (90)	11000 ^b	2.830 ^{bd}	124.67 ^a	27.50 ^{ab}	29.62 ^{cd}	14.56 ^{de}	26.35 ^{gh}
	110	9200 ^{cd}	2.709 ^{de}	117.67 ^b	22.67 ^d	24.21 ^{efg}	11.04 ^{fg}	22.88 ⁱ
	130	8400 ^{cd}	2.547 ^{fg}	94.00 ^{gh}	18.33 ^{gh}	15.87 ^{ijk}	8.69 ^{gh}	22.36 ⁱ
	150	8200 ^{de}	1.785 ^h	90.33 ^{ih}	17.00 ^{hi}	11.97 ^{kl}	7.93 ^{hi}	21.66 ^{ij}
Blanka	Control (90)	13600 ^a	2.814 ^{de}	105.00 ^{ed}	21.33 ^d	26.23 ^{ef}	14.22 ^{de}	20.82 ^{ij}
	110	9200 ^{cd}	2.710 ^{de}	85.33 ^{ijk}	20.00 ^{de}	15.84 ^{ijk}	8.93 ^{gh}	20.01 ^{ij}
	130	8200 ^{de}	1.848 ^h	80.67 ^{kl}	19.00 ^{fg}	12.90 ^{jk}	7.03 ^{hi}	17.42 ^k
	150	5800 ^{hi}	1.346 ⁱ	75.00 ^{lm}	16.50 ^{ij}	10.20 ^l	5.03 ^k	15.95 ^{kl}
Atlas	Control (90)	7200 ^{ef}	2.795 ^{de}	104.67 ^{ed}	19.00 ^{fg}	24.55 ^{efg}	13.86 ^{ef}	24.48 ^{hi}
	110	6000 ^{hi}	2.661 ^{ef}	86.33 ^{ij}	16.00 ^{ij}	14.81 ^{ijk}	7.92 ^{hi}	21.76 ^{ij}
	130	4600 ^{ij}	1.770 ^h	79.33 ^{kl}	14.67 ^{jk}	12.64 ^{jk}	5.69 ^{jk}	17.13 ^k
	150	3800 ^j	1.438 ⁱ	63.33 ^{no}	14.00 ^k	10.69 ^l	4.82 ^k	14.25 ^l

میانگین‌های دارای حرف مشترک، در هر ستون اختلاف معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن ندارند (در سطح احتمال پنج درصد).

Means with the same letters in the same column are not significantly different based on Duncan test ($\alpha=5\%$).

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که رشد، عملکرد و راندمان مصرف آب کینوا تحت تأثیر سطوح مختلف رطوبتی قرار گرفت. از نظر عملکرد دانه پر بازده‌ترین ژنوتیپ، ژنوتیپ‌های Kancolla و Titicaca بودند. کم‌بازده‌ترین ژنوتیپ Atlas برآورد شد. باتوجه‌به نتایج این پژوهش، در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی کینوا، بیشترین میزان کاهش عملکرد به‌ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های Atlas، Kancolla و Blanka در سطح ۱۵۰ میلی‌متر با مقدار کاهش ۶۸، ۶۸ و ۶۷ درصد بود که می‌توان این سه ژنوتیپ را در دسته حساس به تنش خشکی معرفی نمود. از آنجایی که ژنوتیپ Atlas در سطح رطوبتی ۱۳۰ نیز کاهش بیشتری در عملکرد دانه نسبت به دو ژنوتیپ حساس مذکور (K و B) نشان داد؛ بنابراین، در صورت تکرار نتایج در پژوهش‌های بلندمدت می‌توان آن را به‌عنوان حساس‌ترین ژنوتیپ به تنش خشکی در بین ده ژنوتیپ مورد آزمایش نام برد. در مقابل، به‌نظر می‌رسد عملکرد نسبتاً پایدار ژنوتیپ‌های Q1 و Marangani تحت شرایط کم‌آبیاری، حاکی از بهره‌مندی این ژنوتیپ‌ها از سازوکارهای فیزیولوژیکی مؤثر در تحمل خشکی باشد؛ از این‌رو، احتمالاً می‌توان آن‌ها را در گروه ژنوتیپ‌های متحمل به تنش خشکی طبقه‌بندی کرد. با این‌حال، تأیید قطعی این نتایج نیازمند بررسی‌های بیشتر در شرایط مختلف محیطی و طی سال‌های متعدد است. همچنین لازم به ذکر است که ژنوتیپ Atlas در تمامی خصوصیات رشدی مورد بررسی از سایر ژنوتیپ‌ها چه در شرایط نرمال و چه کم‌آبی ضعیفتر از بقیه بود. باتوجه‌به تاریخ برداشت ارقام در یک سال ارزیابی مزرعه‌ای در منطقه کرج، می‌توان به‌صورت مقدماتی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه را از نظر طول دوره رشدی، به سه دسته زودرس (Giza1 و Titicaca) با رسیدگی فیزیولوژیک در نیمه آبان، میان‌رس (Q1، Q3، Q12 و Q29) با رسیدگی در نیمه دوم آذرماه و دیررس (Kancolla، Marangani، Atlas و Blanka) با برداشت در نیمه دی، تقسیم‌بندی کرد. با این‌حال، باتوجه‌به محدودیت انجام ارزیابی (تنها یک سال زراعی)، این تقسیم‌بندی نیازمند تأیید و بررسی‌های بیشتر در سال‌های مختلف و شرایط اقلیمی متنوع‌تر است. با-توجه به نتایج کارایی مصرف آب، بهترین کارایی مصرف آب در ژنوتیپ‌های Q1، Q12، Q29، Giza1 و Marangani مربوط به شدیدترین سطح رطوبتی بود. به‌طور کلی، تعادل مناسب بین کارایی مصرف آب بالا و عملکرد مطلوب، در ژنوتیپ Kancolla در سطح رطوبتی ۹۰ میلی‌متر، ژنوتیپ Titicaca در سطح ۱۱۰ میلی‌متر، و ژنوتیپ Q1 در سطوح رطوبتی ۱۳۰ و ۱۵۰ میلی‌متر حاصل شد. افزایش کارایی مصرف آب در گیاه کینوا تحت شرایط کم‌آبیاری نشان داد که این گیاه توانایی قابل‌توجهی در تولید عملکرد مطلوب در شرایط تنش محیطی دارد. مدیریت مناسب کم‌آبیاری در محصولات کشاورزی نظیر کینوا، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در مواجهه با بحران آب در ایران مطرح شود. با این‌حال، جهت تأیید نتایج حاصل از این پژوهش، انجام آزمایش‌های بیشتر در شرایط مزرعه ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، باتوجه‌به منابع آبی موجود و شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر، یافته‌های این تحقیق نیز در صورت تأیید در پژوهش‌های بلندمدت می‌توانند در سطوح عملی و کاربردی نیز مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

۵. منابع

- Allen, L. & Jr, H. (1991). Effect of increasing carbon dioxide levels and climate change on plant growth, evapotranspiration, and water resources. In *National Research Council, National Academy Press*: 101–147. <https://nap.nationalacademies.org/read/1911/chapter/8#122>.
- Alvar-Beltrán, J., Saturnin, C., Dao, A., Dalla Marta, A., Sanou, J., & Orlandini, S. (2019). Effect of drought and nitrogen fertilization on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions in Burkina Faso. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 33–43. 10.13128/ijam-289.
- Bagheri, M., Anafteh, Z., Keshavarz, S., & Fouladi, B. (2020). Evaluation of quantitative and qualitative characteristics of new quinoa genotypes in spring cultivation in Karaj region. *Iranian Agricultural Research*, 18(4), 465–475. (In Persian). 10.22067/jcsc.2020.37139.0.
- Bahrampour, M., Dehestani Ardakani, M., Shirmardi, M., & Gholamnejad, J. (2019). The effect of different growing media and potassium nanofertilizer on morphophysiological characteristics of marigold under drought stress. *Iranian Horticultural Sciences and Technologies*, 20(1), 65–78. (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16807154.1398.20.1.2.9>.
- Bazile, D., Bertero, H.D., & Nieto, C. (2015). State of the art report on quinoa around the world in 2013. p: 605. ISBN 978-92-5-108558-5.

- Bazile, D., Verniau, A., & Jacobsen, S.E. (2016). Worldwide evaluations of quinoa: Preliminary results from post international year of quinoa FAO projects in nine countries. *Frontiers in Plant Science*, 7, 850. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00850>.
- Behling, R., Roessner, S., Foerster, S., Saemian, P., Tourian, M.J., Portele, T.C., & Lorenz, C. (2022). Interrelations of vegetation growth and water scarcity in Iran revealed by satellite time series. *Scientific Reports*, 12(20784), 1-22. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24712-6>.
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Genetic variability and interrelationships among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.013>.
- Blum, A. (1996). Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. *Plant Growth Regulation*, 20(2), 135-148. <https://doi.org/10.1007/BF00024010>.
- Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2-3), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>.
- Elewa, T.A., Sadak, M.S., & Saad, A.M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, 14(1), 21-33. <https://www.researchgate.net/publication/316976778>.
- 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. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12.
- Fuentes, F., & Paredes-Gonzalez, X. (2013). Nutraceutical perspectives of quinoa: Biological properties and functional applications. In *FAO and CIRAD: State of the art report of quinoa in the world*: 286-299. 10.13140/RG.2.1.4294.2565.
- Gámez, A.L., Soba, D., Zamarreno, A.M., Garcia-Mina, J.M., Aranjuelo, I., & Morales, F. (2019). Effect of water stress during grain filling on yield, quality and physiological traits of Illpa and Rainbow quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Plants*, 8(6), 173. <https://doi.org/10.3390/plants8060173>.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J., & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 28(3), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.008>.
- Gómez-Pando, L.R., Álvarez-Castro, R., & Eguiluz-de la Barra, A. (2019). Effect of salt stress on Peruvian germplasm of *Chenopodium quinoa* Willd.: A promising crop. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196, 391-396. 10.1111/j.1439-037X.2010.00429.x.
- Hay, R.K.M. (1995). Harvest index: A review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126, 197-216. 10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x.
- Hossain, A.B.S., Sears, R.G., Cox, T.S., & Paulsen, G.M. (1990). Desiccation tolerance and its relationship to assimilate partitioning in winter wheat. *Crop Science*, 30(3), 622-627. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030030x>.
- Jacobsen, S.E., Jensen, C.R., & Liu, F. (2012). Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 128, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.001>.
- Jamali, S. (2017). Investigation the effects of different levels of salinity and deficit irrigation on yield and yield components of quinoa. MSc thesis. Gorgan university of Agriculture science and Natural resource. (In Persian). 10.22069/JWSC.2018.13721.2841.
- Jamali, S., & Ansari, H. (2021). Evaluation of irrigation management on yield, yield components, and water use efficiency of quinoa (cv Giza-1). *Iranian Journal of Water Research*, 15(3), 91-99. (In Persian). https://iwrij.sku.ac.ir/article_11146.html?lang=en.
- Jamali, S., Goladani, M., & Zeinaldin, S.M. (2019). Investigation the effect of periodic water stress on the yield and water use efficiency of quinoa (Genotype NSRCQ). *Iranian Irrigation and Drainage*, 13(6), 1687-1697. (In Persian). <https://sid.ir/paper/131797/en>.
- Jayme-Oliveira, A., Ribeiro Junior, W.Q., Ramos, M.L.G., Ziviani, A.C., & Jakelaitis, A. (2017). Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 52(8), 561-571. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800001>.
- Jbawi, E.A., Danoura, R., & Yaacoub, A. (2018). Effect of deficit irrigation and manure fertilizer on improving growth and yield of quinoa in Syria. *Agriculture Research*, OAJAR-100007, 1-11. <https://www.researchgate.net/publication/331113314>.
- Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S.K., & Becker, D.F. (2013). Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants and Redox Signaling*, 19, 998-1011. 10.1089/ars.2012.5074.
- Misra, M. (2009). Management of Iran's arid lands. *International Journal of Environmental Studies*, 66(3), 287-288. 10.1080/00207230902899529.

- Pathan, S.M., Abbas, G., Mubeen, M., Hussain, M., Farooq, M., & Ahmad, R. (2023). Yield and nutritional responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought stress. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1242187. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1242187>.
- Rafik, S., Chaoui, M., Assabban, Y., Jazi, S., Choukr-Allah, R., El Gharouss, M., & Hirich, A. (2021). Quinoa value chain, adoption, and market assessment in Morocco. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28, 46692–46703. [10.1007/s11356-020-11375-x](https://doi.org/10.1007/s11356-020-11375-x).
- Razzaghi, F., Henriksen, S., Naghdizadegan, J.M., Andersen, M.N., & Jacobsen, S.E. (2016). Potential of quinoa production in humid and dry regions under different irrigation and soil conditions: Denmark and Iran. *International Quinoa Conference 2016*, p: 142. UAE: Dobai.
- Reynolds, M., Foulkes, M.J., Salfer, G.A., Berry, P., Parry, M.A.J., Snape, J.W., & Angus, W.J. (2009). Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60, 1899–1918. [10.1093/jxb/erp016](https://doi.org/10.1093/jxb/erp016).
- Ruiz, K.B., Biondi, S., Oses, R., Acuna-Rodriguez, I.S., Antognoni, F., Martinez-Mosqueira, E.A., Coulibaly, A., Canahua-Murillo, A., Pinto, M., Zurita-Silva, A., Bazile, D., Jacobsen, S.E., & Molina-Montenegro, M.A. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 349–359. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0195-0>.
- Saini, H.S., & Westgate, M.E. (2000). Reproductive development in grain crops during drought. *Advances in Agronomy*, 68, 59–96. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60843-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60843-3).
- Salehi, F., Ahmadi, A., Basiri, R., & Mirabzadeh, M. (2019). Effect of moisture regimes on yield and water use efficiency in three wheat cultivars in Karaj. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 49(4), 25-34. (In Persian). [10.22059/IJFCS.2018.218354.654204](https://doi.org/10.22059/IJFCS.2018.218354.654204).
- Stanhill, G. (1986). Water use efficiency. *Advances in Agronomy*, 39, 53–85. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60465-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60465-4).
- Talebnejad, R., & Sepaskhah, A.R. (2015). Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. *Agricultural Water Management*, 159, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.005>.
- Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martinez, 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(15), 2541–2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>.
- Yang, A., Akhtar, S.S., Iqbal, S., Amjad, M., Naveed, M., Zahir, Z.A., & Jacobsen, S.E. (2016). Enhancing salt tolerance in quinoa by halotolerant bacterial inoculation. *Functional Plant Biology*, 43, 632–642. [10.1071/FP15265](https://doi.org/10.1071/FP15265).