

Original article

Growth response of two quinoa cultivars to partial root irrigation under climatic conditions of South Khorasan province

Azam Gideski¹, Soheil Parsa^{2, 4*}, Majid Jami Al-Ahmadi^{2, 4}, Ali Izanloo^{3, 4}

1. PhD student in Crop Physiology, University of Birjand, Iran

2. Faculty member, Department of Plant Production and Genetics, University of Birjand, Iran

3. Senior Scientist at the New Zealand Institute for Bioeconomy Science Limited, Auckland, New Zealand

4. Plant and Environmental Stress Research Group, University of Birjand

Received 7 September 2024; Revised 16 December 2025; Accepted 26 December 2025

Extended abstract

Introduction

Optimizing irrigation in arid regions is a crucial strategy for sustainable crop production. Quinoa, due to its high tolerance to drought, represents a promising alternative crop. Understanding its physiological and yield responses to deficit irrigation can enhance water-use efficiency in semi-arid systems.

Materials and methods

A field experiment was conducted during 2021 in Birjand and Sarbisheh, South Khorasan Province, Iran. The study was arranged as a split-plot based on a randomized complete block design with three replications. The main factor consisted of nine irrigation regimes, including 100%, 75%, and 50% of crop water requirement under both conventional and partial root-zone drying (PRD) methods—fixed and alternating after one or two irrigation cycles. The sub-plot factor included two quinoa cultivars, Titicaca and Giza-1. Measured traits included plant height, leaf area, fresh and dry weights of total aerial biomass, and relative water content (RWC). Data were analyzed using SAS software.

Results and discussion

Analysis of variance revealed significant effects of irrigation regime, cultivar, and their interactions on most measured traits. Grain yield, plant height, relative leaf water content and leaf area decreased progressively under higher drought intensity, but moderate deficit irrigation (75% ETc) under alternating PRD after one or two irrigation cycles, maintained growth comparable to full irrigation. The Giza-1 cultivar exhibited greater adaptability and vigor than Titicaca across both locations, particularly under moderate water limitation. Fresh and dry weights of aerial organs followed similar trends. Plants exposed to alternating PRD retained higher biomass accumulation and grain yield than those under conventional irrigation at equivalent deficit levels. Grain yield under partial root-zone drying (PRD) is often better maintained compared with uniform deficit irrigation, as alternating wet and dry root zones enhance ABA signaling and support more stable grain filling under water-limited conditions (Kang and Zhang, 2004). This improvement may be attributed to balanced root signaling, enhanced stomatal regulation, and improved osmotic adjustment mechanisms (Naderi et al., 2016; Chandra et al., 2018). Higher leaf relative water content (RWC) in alternating PRD treatments (75% ETc) suggests improved plant hydration and efficient water redistribution within the rhizosphere, confirming that partial root drying can induce systemic tolerance responses without excessive water loss (Wakrim et al., 2015). The observed maintenance of leaf area and turgor under alternating PRD supports the hypothesis that

* Corresponding author: Soheil Parsa; E-Mail: sparsa@birjand.ac.ir



controlled soil drying stimulates abscisic acid (ABA) synthesis in drying roots, which limits transpiration while sustaining photosynthesis. As a result, fresh and dry biomass, showed minimal reduction compared with the 100% irrigation control. Conversely, conventional irrigation at 50% ETC caused a marked decline in all growth parameters, highlighting the physiological limitations when both root zones experience continuous stress. Changes in RWC and leaf area were strongly associated with fresh biomass, suggesting that maintaining tissue hydration is key to sustaining growth under moderate water deficit. These findings align with those of [Razzaghi et al. \(2020\)](#) and [Mirsafi et al. \(2024\)](#), who reported similar adaptive responses in quinoa under deficit irrigation. Giza-1 superior growth performance, especially in Birjand's lighter-textured soils, reflects genotype-specific root plasticity and efficient osmotic adjustment mechanisms enhancing drought resilience.

Conclusion

This study demonstrated that deficit irrigation, particularly alternating partial root-zone drying at 75% of crop water requirement, effectively conserved water without significant yield reduction in quinoa. The Giza-1 cultivar showed stronger physiological stability, higher biomass, and leaf hydration than Titicaca under moderate drought. The enhanced performance under alternating PRD suggests that controlled soil drying triggers adaptive root-to-shoot signaling, promoting efficient water use and sustained photosynthetic capacity. Therefore, implementing alternating PRD combined with suitable cultivars such as Giza-1 can serve as a practical strategy for sustainable quinoa production in arid regions like South Khorasan, where water resources are limited.

Keywords: Giza-1, Leaf Area Index, Partial Root-Zone Drying, Relative Water Content, Titicaca

پاسخ رشدی دو رقم کینوا به آبیاری بخشی ریشه در شرایط اقلیمی خراسان جنوبی

اعظم گیدسکی^۱، سهیل پارسا^{۲*}، مجید جامی الاحمدی^۳، علی ایزانلو^۴

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشگاه بیرجند
۲. عضو هیئت علمی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه بیرجند
۳. دانشمند ارشد در موسسه علوم اقتصاد زیستی، اوکلند، نیوزیلند
۴. گروه پژوهشی گیاه و تنش‌های محیطی، دانشگاه بیرجند

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: آبیاری بخشی ریشه تیتیکاکا شاخص سطح برگ گیزا وان محتوای نسبی آب برگ	بهینه‌سازی مصرف آب در تولیدات زراعی مناطق خشک، ضرورتی انکارناپذیر برای پایداری تولید و حفظ امنیت غذایی به شمار می‌رود. در این راستا، استفاده از روش‌های نوین آبیاری و انتخاب ارقام سازگار، می‌تواند نقش بسزایی در افزایش بهره‌وری آب و بهبود شاخص‌های رشد گیاهانی نظیر کینوا ایفا کند. بدین منظور و جهت بررسی اثر آبیاری موضعی ریشه بر پارامترهای رشدی دو رقم کینوا (تیتیکاکا و گیزا وان)، آزمایشی در سال ۱۴۰۰ در شهرستان‌های بیرجند و سریشه استان خراسان جنوبی به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی آبیاری در ۹ سطح شامل، ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، کم آبیاری بر اساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به صورت سنتی، آبیاری موضعی ریشه به صورت ثابت و بالاخره آبیاری موضعی ریشه بطور متناوب (یک در میان) در طرفین پشته، بعد از یک و دو دوره آبیاری؛ عامل فرعی شامل دو رقم کینوا (تیتیکاکا و گیزا وان) بود. نتایج نشان داد که پارامترهای رشدی در تیمارهای کم آبیاری موضعی ریشه به طور متناوب، بعد از یک و دو دور آبیاری با ۷۵ درصد نیاز آبی، وضعیت مطلوبی داشتند. در صفاتی مانند وزن تر و خشک (بوتنه، خوشه و ساقه)، شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، حتی بر مقادیر این صفات در تیمار آبیاری کامل نیز برتری داشتند، اگرچه از نظر آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در مقابل، تیمار آبیاری سنتی با ۵۰ درصد نیاز آبی، موجب کاهش معنی‌داری در تمامی شاخص‌های مورد مطالعه شد. رقم گیزا وان در اغلب صفات رشدی نسبت به تیتیکاکا برتر بود، به‌ویژه در منطقه بیرجند که شرایط خاک و آب مطلوب‌تری داشت. به‌طور کلی، استفاده از رقم گیزا وان و کم آبیاری موضعی ریشه به طور متناوب، بعنوان راهکار مؤثری در تولید پایدار کینوا در خراسان جنوبی و مناطقی کم‌آب با شرایط اقلیمی مشابه قابل توصیه است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵	
تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۵ ۷۹-۹۹ (۱)	

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک (نظیر خراسان جنوبی) که محدودیت منابع آب یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده تولیدات کشاورزی آنست، به شمار رود (Samadzadeh et al., 2020). بهینه‌سازی مصرف آب در تولیدات زراعی، بالاخص در مناطق خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه پایین و تبخیر و تعرق بالقوه بالا، ضرورتی انکارناپذیر محسوب می‌شود. پیش‌بینی‌های اقلیمی نشان می‌دهد که در سناریوهای تغییر اقلیم، فراوانی و شدت خشکسالی در ایران روبه‌افزایش است و

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) یک شبه‌غله کهن است که به دلیل ارزش غذایی بسیار بالا شامل پروتئین با کیفیت، ترکیب متعادل اسیدهای آمینه، عاری از گلوتن و غنی از مواد معدنی، شهرت جهانی یافته است (Amiryousefi et al., 2019). طی دهه اخیر، کینوا به دلیل مقاومت به تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی، شوری و دماهای نامتعارف، به‌عنوان یک گیاه راهبردی در امنیت غذایی و کشاورزی پایدار مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این ویژگی‌ها سبب شده تا کینوا گزینه‌ای مناسب برای کشت

به‌عنوان اثرات مستقیم محدودیت آب مشاهده شد که ناشی از اختلال در تقسیم سلولی و رشد طولی بافت‌ها بود (Mirsaifi et al., 2024). علاوه بر آن، مطالعه آوا و همکاران (Awa et al., 2024) نشان داد که در شرایط تنش خشکی برگ‌های کینوا کاهش معنی‌داری در شاخص‌های SPAD دارند و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده سازگاری فیزیولوژیک این گیاه به کم‌آبی است، اگرچه کاهش شدید آب تا ۵۰ درصد نیاز تبخیرتقرقی گیاه، می‌تواند کاهش محسوس عملکرد و کارایی مصرف آب را به‌دنبال داشته باشد؛ این پژوهش پیشنهاد می‌کند که تأمین کامل نیاز آبی در مراحل حساس رشدی همچون گل‌دهی و پر شدن دانه، برای حفظ عملکرد مهم است. پژوهش رزاقی و همکاران نیز نشان می‌دهد که کاهش سطح برگ، کوچک‌شدن سطح تعرق و تغییر در مورفولوژی ریشه، از سازوکارهای اجتنابی کینوا در واکنش به خشکی هستند، اما همین سازوکارها در شرایط شدید کم‌آبی می‌توانند به افت عملکرد منجر شوند. بنابراین، شواهد بین‌المللی حاکی از آن هستند که مدیریت دقیق آبیاری - به‌ویژه کاهش محدودیت آب در مراحل بحرانی می‌تواند این گیاه مقاوم را به‌طور مؤثری در مناطق خشک پایدار سازد (Razzaghi et al., 2020).

باوجود اهمیت مدیریت مصرف آب و راهبرد آبیاری بخشی ریشه، مطالعات زیادی به بررسی اثرات ترکیبی این راهبرد آبیاری در شرایط اقلیم خشک ایران پرداخته‌اند. ارقام مختلف کینوا دارای ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی متفاوتی هستند که می‌تواند بر پاسخ آن‌ها به کم‌آبی اثر بگذارد. رقم تیتیکاکا به دلیل بلوغ زودرس و چرخه رشد کوتاه، پتانسیل بیشتری برای کشت در محیط‌های کم‌آب دارد، درحالی‌که رقم گیزا وان در شرایط آب کافی بیوماس بیشتری تولید کرده و توسعه سایه‌انداز بهتری دارد (Bagheri, 2018). بااین‌حال، مقایسه مستقیم این ارقام تحت شرایط آبیاری بخشی ریشه در اقلیم خراسان جنوبی، به‌ویژه بر روی صفات رویشی و محتوای نسبی آب گیاه، تاکنون محدود بوده است. علاوه بر این، تفاوت‌های محیطی بین بیرجند (گرم و خشک) و سریشه (سرد و خشک) از جمله تغییرات دمایی، بافت خاک و میزان تبخیر و تعرق، می‌تواند واکنش‌های متفاوت گیاهان به آبیاری بخشی ریشه

استان‌های خشک بیشترین آسیب‌پذیری را خواهند داشت؛ بنابراین، توسعه راهبردهای آبیاری پایدار که بتوانند مصرف آب را کاهش داده و درعین‌حال عملکرد مطلوب را حفظ کنند، برای امنیت غذایی این مناطق حیاتی است (Sepaskhah et al., 2010).

آبیاری بخشی ریشه^۱ یکی از راهبردهای نوین مدیریت آبیاری است که با هدف بهبود کارایی مصرف آب طراحی شده است. در این راهبرد، تنها نیمی از ناحیه ریشه در هر نوبت آبیاری مرطوب شده و نیمه دیگر خشک می‌ماند، سپس در نوبت بعدی جای دو نیمه عوض می‌شود (Barideh et al., 2018). این شیوه با بهره‌گیری از مسیرهای سیگنال‌دهی طبیعی گیاه، به‌ویژه تولید هورمون اسید آبسزیک در ریشه‌های بخش خشک، موجب بسته شدن نسبی روزه‌ها و کاهش تعرق، بدون کاهش متناسب فتوسنتز می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که آبیاری بخشی ریشه می‌تواند وضعیت آبی گیاه را حفظ کرده، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش دهد و تخصیص کربوهیدرات‌ها را بهینه سازد، که در نتیجه رشد و عملکرد در شرایط محدودیت آب حفظ می‌شود (Wang et al., 2010).

صفات رشدی مانند ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ و وزن تر و خشک اندام‌های گیاهی، عوامل تعیین‌کننده کلیدی ظرفیت فتوسنتزی و پتانسیل عملکردی گیاهان هستند. در کینوا، توسعه رویشی به‌طور مستقیم بر پر شدن دانه از طریق افزایش دریافت نور توسط سایه‌انداز و تأمین مواد فتوسنتزی، اثر می‌گذارد (Raney et al., 2012). همچنین، محتوای نسبی آب برگ به‌عنوان شاخص فیزیولوژیکی مهم وضعیت آبی گیاه، بازتابی از تعادل بین جذب آب و اتلاف آن از طریق تعرق است. حفظ محتوای نسبی آب بالا تحت شرایط کم‌آبی، معمولاً با تحمل بیشتر به خشکی، پایداری فشار تورژانس و کاهش پیری زودرس برگ مرتبط است (Sade et al., 2011).

مطالعات متعددی واکنش کینوا به آبیاری محدود، از جمله آبیاری بخشی ریشه را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، میر سفی و همکاران گزارش کردند که در شرایط کاهش آب تا ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی، شاخص سطح برگ در کینوا به ترتیب حدود ۱۱.۹٪ و ۲۴.۱٪ نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت. همچنین کاهش ارتفاع بوته، قطر ساقه و سطح برگ

^۱. Partial Root Irrigation

کم آبیاری متناوب (جویچه ای یک در میان متغیر) در طرفین پشته پس از یک نوبت آبیاری (PRI1-75 و PRI1-50) و پس از دو نوبت آبیاری (PRI2-75 و PRI2-50)، بود. عامل فرعی، دو رقم تیتیکاکا (وارداتی از دانمارک) و گیزا وان (وارداتی از منطقه مدیترانه)، به عنوان مهم ترین ژنوتیپ های آزمایش شده در مناطق خشک کشور، مورد استفاده قرار گرفته اند. آبیاری در کلیه تیمارها به روش آبیاری سطحی و به صورت جوی و پشته اجرا گردید. ابعاد هر کرت فرعی ۳×۴ متر (۱۲ متر مربع) در نظر گرفته شد. فاصله بین ردیف های کاشت ۵۰ سانتی متر و تراکم بوته ۶۰ بوته در متر مربع بود. فاصله بین کرت های فرعی و اصلی به ترتیب یک و ۱/۵ متر تعیین شد. بذر مورد استفاده از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (کرج) تهیه گردید. تاریخ کاشت در مزرعه بیرجند، ۲۲ مرداد ۱۴۰۰ و در منطقه سربیشه، ۲۸ مرداد ۱۴۰۰ بود. کوددهی بر اساس آزمایشات آب و خاک در هر منطقه (جدول ۱)، انجام گرفت به نحوی که سولفات پتاسیم، سوپرفسفات و اوره به ترتیب به میزان ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار، در قبل از کاشت و همزمان با آماده سازی زمین به خاک اضافه شد. مابقی کود اوره (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) در دو مرحله به صورت سرک در مرحله ۶ تا ۸ برگی و ظهور سنبله اضافه شد. در مزرعه سربیشه، به دلیل شوری بالای خاک، در مرحله شخم از کمپوست دامی استفاده شد که به وسیله دستگاه کودپاش پخش گردید.

میزان آب آبیاری با استفاده از نرم افزار Cropwat 8.0 و بر اساس داده های هواشناسی ایستگاه های بیرجند و سربیشه محاسبه شد. تیمارهای آبیاری از مرحله چهاربرگی آغاز گردید. حجم آب مورد نیاز هر کرت، بر اساس نیاز خالص آبیاری و به صورت هفتگی توسط نرم افزار تعیین و سپس به منظور توزیع دقیق آب بین کرت ها، از پمپ و کنتور استفاده شد. میزان آب آبیاری و تعداد دفعات آبیاری در این پژوهش، در جدول ۲ ارائه شده است. برداشت کینوا در مزرعه بیرجند برای ارقام تیتیکاکا و گیزا وان به ترتیب در ۲۸ آبان و ۱۲ آذر، و در مزرعه سربیشه برای رقم تیتیکاکا در ۴ آذر و برای رقم گیزا وان در ۱۸ آذر، انجام و دو هفته پیش از برداشت، آبیاری قطع گردید.

اندازه گیری برخی صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک از قبیل ارتفاع، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک بوته و محتوای نسبی آب برگ، در انتهای مرحله گل دهی و در ۵ بوته انجام شد. پس از توزین نمونه های جمع آوری شده، جهت

را در پی داشته باشد؛ بنابراین، انجام آزمایش های چند مکانی برای دستیابی به توصیه های منطقه ای قابل اعتماد در مدیریت آبیاری کینوا، ضروری است. این گونه پژوهش ها علاوه بر ارائه راهکارهای عملی برای کشاورزان، به درک علمی تعاملات ژنوتیپ × محیط × مدیریت در سیستم های زراعی متحمل به خشکی، کمک می کنند.

این مطالعه با هدف بررسی اثرات آبیاری بخشی ریشه بر پارامترهای کلیدی رشد رویشی شامل ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک اندام های گیاهی و محتوای نسبی آب برگ و عملکرد دانه در دو رقم کینوا در شهرستان های بیرجند و سربیشه انجام شده است. فرض بر این است که آبیاری بخشی ریشه کاهش محدودی در رشد رویشی ایجاد کرده، ولی با حفظ محتوای نسبی آب گیاه، منجر به بهبود بهره وری آب خواهد شد. شناسایی پاسخ های ویژه هر رقم می تواند در انتخاب رقم و برنامه ریزی مدیریت آبیاری کینوا در مناطق خشک ایران نقش مهمی ایفا کند. با توجه به نیاز فوری به توسعه روش های صرفه جویی در مصرف آب در کشاورزی، نتایج این پژوهش هم از نظر محلی و هم در سطح ملی و جهانی اهمیت دارد. در سطح محلی، می تواند به تولیدکنندگان کینوا در خراسان جنوبی کمک کند تا برنامه های آبیاری و انتخاب رقم را بهینه کنند، و در سطح ملی و جهانی، به بدنه علمی روبرو رشد در زمینه استفاده از آبیاری بخشی ریشه به عنوان ابزاری برای تولید پایدار در محیط های کم آب افزوده شود.

مواد و روش ها

این پژوهش در دو منطقه از استان خراسان جنوبی اجرا شد: مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند (عرض جغرافیایی ۳۲°۵۶' شمالی، طول جغرافیایی ۵۹°۱۳' شرقی، ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا) و مزرعه ای در شهرستان سربیشه (روستای مختاران، با عرض جغرافیایی ۳۲°۲۸' شمالی، طول جغرافیایی ۵۹°۲۲' شرقی، ارتفاع ۱۴۹۹ متر از سطح دریا). این آزمایش به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عامل اصلی، آبیاری در ۹ سطح شامل: آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (FI)، کم آبیاری به روش سنتی معادل ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (RD-75 و RD-50)، آبیاری بخشی ریشه به صورت جویچه ای یک در میان ثابت با ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی (FPRI-75 و FPRI-50)، و

اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۲ درجه‌سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید. ارتفاع گیاه از محل رویش گیاه تا ابتدای رویش گل‌آذین و طول ساقه از سطح زمین تا انتهای گل‌آذین بود.

جدول ۱. آزمایشات خاک و آب مناطق مورد مطالعه

Table 1. The results of soil and water analysis in the studied areas															
Soil analysis results															
منطقه	نتایج آزمایش خاک														
Location	pH	EC	Soil Texture	Clay	Silt	Sand	SAR	Mg	Ca	K	Na	Cl	K	P	HCO ₃
		dS.m ⁻¹		-----%-----				-----meq.lit ⁻¹ -----				---m.kg ⁻¹ ---		meq.lit ⁻¹	
بیرجند	8	4.3	Loamy sand	4	18	78	9.65	4.5	9.3	0.5	25.	19	180	9.3	2.8
Birjand									3	3					
سریشه	8	6.5	Sandy loam	8	26	66	11.9	7.8	13.	1.5	38.	29	180	11.5	2.6
Sarbisheh									4	7					
Water analysis results															
نتایج آزمایش آب															
	pH	EC	Mg	Ca	K	Na	Cl	HCO ₃							
		dS.m ⁻¹	-----meq.lit ⁻¹ -----												
بیرجند	8.5	1.78	1.5	3.2	0.09	11.4	10.15	3							
Birjand															
سریشه	7.2	5.55	6.7	11.3	1.3	35.4	69	5.45							
Sarbisheh															

جدول ۲. تعداد دفعات آبیاری و حجم کل آب کاربردی برای هر تیمار

Table 2. The number of irrigation and total applied water volume for each treatment							
منطقه	رقم	Total water applied (m ³)					تعداد دفعات آبیاری
		FI	RD-75	RD-50	PRI-75	PRI-50	
Location	Variety	حجم کل آب مصرفی (مترمکعب)					Total number of irrigation
بیرجند	تیتیکا	5442	4515.5	3589	4515.5	3589	13
	گیزاوان	5654	46745	3695	46745	3695	14
سریشه	تیتیکا	5731	4742.5	3754	4742.5	3754	13
	گیزاوان	5963	4916.5	3870	4916.5	3870	14
	Giza 1						

FI: آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیازآبی گیاه (شاهد)، RD-75 و RD-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به صورت سنتی، PRI-75 و PRI-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به روش خشکی موضعی ریشه

FI: Irrigation based on 100% of the crop water requirement (control treatment), RD-75 and RD-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using the conventional irrigation method, PRI-75 and PRI-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using the partial root-zone irrigation (PRI) method

۲۴ ساعت در دمای ۴ °C در پتری دیش‌های حاوی ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر و به دور از نور قرار گرفته و توزین شدند. وزن خشک برگ‌ها نیز پس از قراردادن آنها به‌مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس تعیین و در نهایت محتوای نسبی آب برگ طبق رابطه ۱ تعیین شد:

$$RWC\% = ((FW-DW) / (TW-DW)) \times 100 \quad [1]$$

به‌منظور محاسبه محتوای نسبی آب برگ، در پایان مرحله گلدهی در هر تیمار، آخرین برگ بالغ و توسعه‌یافته پنج بوته کینوا انتخاب و پس از جداکردن از ساقه، در پلاستیک زیپ‌دار قرار داده و بلافاصله داخل فلاسک یخ به آزمایشگاه منتقل و وزن تر آن‌ها با ترازوی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری وزن آماس، برگ‌ها به مدت

زیست‌توده شدند، اما نسبت توزیع ماده خشک بین اندام‌های زایشی و رویشی تحت‌تأثیر قرار نگرفته و شاخص برداشت از پایداری نسبی برخوردار بوده است.

همچنین اثر مکان کشت بر صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال $P \leq 0.01$ و بر صفت محتوای نسبی آب برگ در سطح $P \leq 0.05$ معنی‌دار شد، درحالی‌که این عامل بر شاخص برداشت اثر معنی‌داری نداشت. اثر رقم نیز بر تمامی صفات مورد بررسی شامل عملکرد دانه، شاخص برداشت، ارتفاع بوته، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سطح برگ، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه کینوا در سطح آماری معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تفاوت ژنتیکی ارقام در پاسخ به شرایط محیطی و مدیریتی است.

در بررسی اثرات متقابل، نتایج نشان داد که اثر متقابل آبیاری \times رقم بر عملکرد دانه در سطح احتمال $P \leq 0.01$ معنی‌دار بود که بیانگر واکنش متفاوت ارقام کینوا به سطوح مختلف آبیاری از نظر تولید دانه است. علاوه بر این، اثر متقابل آبیاری \times مکان در سطح $P \leq 0.01$ و اثرات متقابل آبیاری \times رقم، رقم \times مکان و اثر متقابل سه‌گانه آبیاری \times رقم \times مکان بر وزن تر اندام هوایی در سطح احتمال $P \leq 0.05$ معنی‌دار گردید که حاکی از وابستگی پاسخ این صفت به ترکیب شرایط محیطی و ژنتیکی است.

براین‌اساس، در بخش‌های بعدی پژوهش، برای صفاتی نظیر ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ و محتوای نسبی آب برگ که اثرات اصلی آبیاری، مکان و رقم به‌صورت مستقل معنی‌دار بوده و اثرات متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود، تحلیل اثرات ساده عوامل انجام شد. در مقابل، برای صفاتی مانند عملکرد دانه و به‌ویژه وزن تر اندام هوایی که اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه معنی‌دار مشاهده گردید، تجزیه مرکب داده‌ها به‌منظور تبیین دقیق‌تر واکنش سطوح مختلف آبیاری و ارقام در مکان‌های مختلف صورت گرفت.

اثر آبیاری بر خصوصیات رشدی

ارتفاع

بیشترین ارتفاع گیاه، در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) به‌دست آمد که به‌عنوان شاهد، بهترین شرایط رطوبتی را برای رشد فراهم کرده بود (جدول ۵). در میان تیمارهای کم‌آبیاری، تیمار آبیاری یک‌درمیان پس از دو نوبت آبیاری با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی (PRI2-75)، تنها ۹/۳ درصد کمتر

در این معادله FW وزن تر، DW وزن خشک و TW وزن آماس هستند.

برای اندازه‌گیری سطح برگ، تعداد پنج بوته از هر کرت از روی خاک کف بر و به آزمایشگاه منتقل شد، سپس برگ هر بوته از محل دم‌برگ جدا شده و سطح برگ‌ها توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ تعیین و به کمک رابطه ۲، محاسبه شد.

$$LAI = \frac{LA}{GA} \quad [2]$$

LAI شاخص سطح برگ، LA سطح برگ و GA سطح زمین است.

برای تعیین عملکرد دانه، سنبله‌های گیاهان جدا شده و با ضربه‌زدن، دانه‌ها از سنبله جدا و از الک عبور داده شدند. سپس عملکرد دانه با ترازوی دقیق تا هزارم گرم اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری شاخص برداشت از فرمول ذیل استفاده گردید:

$$[3] \quad 100 \times \frac{\text{عملکرد دانه}}{\text{عملکرد بیولوژیک}} = \text{شاخص برداشت}$$

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹.۴ انجام گرفت. بررسی معنی‌داری اثرات اصلی و متقابل، با تجزیه واریانس مرکب در دو منطقه‌ی آزمایشی (بیرجند و سربیشه) صورت پذیرفت. قبل از انجام تجزیه، آزمون بارتلت برای بررسی همگنی واریانس‌ها بین دو مکان اجرا شد، که معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار محافظت شده (FLSD)، در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارها و تحلیل گرافیکی روند تغییرات صفات، با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد. کلیه داده‌های خام قبل از تجزیه، از نظر نرمال بودن توزیع خطاها و یکنواختی واریانس‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، عامل آبیاری به‌عنوان فاکتور اصلی پژوهش، اثر معنی‌دار و بسیار قابل توجهی ($P \leq 0.01$) بر عملکرد دانه، ارتفاع بوته، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سطح برگ، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه کینوا داشت که بیانگر نقش تعیین‌کننده سطوح مختلف آبیاری در کنترل رشد مورفولوژیک و ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه است. در مقابل، اثر آبیاری بر شاخص برداشت از نظر آماری معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد اگرچه تغییرات رطوبتی موجب تغییر در عملکرد دانه و تولید

ارتفاع بوته در سایر تیمارهای ۵۰ درصد نیز، مانند FPRI-50، PRI1-50 و PRI2-50 به ترتیب با کاهش‌های ۲۳، ۱۶/۷ و ۱۵/۸ درصدی مواجه بودند. همانطور که از نتایج پیداست، با اعمال سطوح آبیاری بخشی ریشه، میزان کاهش ارتفاع در شرایط تنش خشکی کمتر می‌گردد و به عبارت دیگر از شدت تنش کاسته می‌شود. استفاده از راهکارهایی چون آبیاری یک یا دو درمیان یا آبیاری بخشی ریشه در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی، موجب کاهش کمتر رشد کینوا نسبت به شاهد گردید بنابراین، این راهبرد می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت منابع آبی در مناطق کم‌آب توصیه شود.

از تیمار شاهد بود. همچنین، تیمارهای PRI1-75 و FPRI-75 به ترتیب، کاهش ارتفاعی در حدود ۱۱ تا ۱۲/۵ درصد را نسبت به آبیاری کامل نشان دادند این درحالی است که RD75 موجب کاهش ۱۴/۵ درصدی ارتفاع بوته گردیده بود. این نتایج بیانگر آن است که مدیریت هوشمند کم‌آبیاری در سطح ۷۵ درصد می‌تواند ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، رشد طولی گیاه را به‌طور معنی داری حفظ نماید. در مقابل، کاهش تأمین آب تا ۵۰ درصد نیاز آبی، تأثیر منفی قابل‌ملاحظه‌ای بر ارتفاع بوته داشت. تیمار آبیاری سنتی (RD-50) نسبت به شاهد، کاهش ۲۸/۳ درصدی را نشان داد.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس پارامترهای رشدی گیاه کینوا

Table 3. Analysis of variance of Quinoa growth parameters

S.O.V	درجه آزادی df	معمکرد دانه Seed Yield	شاخص برداشت Harvest Index		محتوای نسبی آب برگ RWC		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight
			ارتفاع Height	سطح برگ LAI	نسبی آب برگ RWC	نسبی آب برگ RWC		
Location (L)	1	2827308.7**	12.84 ^{ns}	6631.50**	34.88**	1050.61*	2173.39**	37099.9**
Block × Location	4	116304.6	44.31	4.720	1.147	92.42	28.66	46.69
Irrigation (I)	8	2195902.9**	15.22 ^{ns}	670.15**	10.98**	336.38**	442.43**	7671.97**
I × L	8	60565.6 ^{ns}	3.83 ^{ns}	85.55 ^{ns}	0.42 ^{ns}	34.76 ^{ns}	14.28 ^{ns}	266.28**
Block (I × L)	32	64535.2	8.66	49.210	1.342	59.14	11.32	74.42
Cultivar (C)	1	7065087.7**	86.91**	1534.61**	32.32**	416.28**	1155.85**	27129.6**
I * C	8	203332.9**	11.98 ^{ns}	56.06 ^{ns}	0.160 ^{ns}	27.74 ^{ns}	14.25 ^{ns}	251.95*
C × L	8	9530.8 ^{ns}	17.48 ^{ns}	0.0002 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.49 ^{ns}	62.94 ^{ns}	541.62*
I × C × L	8	29315.3 ^{ns}	9.75 ^{ns}	55.17 ^{ns}	1.764 ^{ns}	74.25 ^{ns}	20.28 ^{ns}	223.68*
Error	36	62123.45	10.14	46.56	1.08	53.14	17.41	97.14
ضریب تغییرات CV (%)		17.51	21.86	8.69	17.24	10.66	13.24	11.51

*, **, و ^{ns}: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و عدم معنی‌داری

*, **, and ^{ns} represent significant at 5% and 1% probability level and not significant, respectively.

نور، رقابت‌پذیری بالاتر و در نهایت افزایش عملکرد بیولوژیک می‌گردد. ارتفاع گیاه کینوا تحت تأثیر مستقیم تنش آبی و ژنوتیپ قرار دارد، به‌طوری‌که در پژوهشی، میانگین ارتفاع از ۸۸/۹ سانتی‌متر در شرایط بدون تنش، به ۷۹/۸ سانتی‌متر در تنش متوسط و به ۵۱/۸ سانتی‌متر در تنش شدید کاهش

کاهش محتوای رطوبت خاک، اختلال در جذب آب توسط ریشه و کاهش طول ساقه و ارتفاع بوته را در پی دارد (Khaleghi et al., 2020). ارتفاع بوته، یکی از صفات کلیدی در تعیین عملکرد و بهره‌مندی از نور است؛ چراکه افزایش ارتفاع منجر به نفوذ بهتر نور در کانوپی، جذب بیشتر

بخشی ریشه با جویچه ثابت و تأمین ۶۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد؛ اولین واکنش گیاه نسبت به تنش آبی، کاهش رشد برگ‌ها است. تنش آبی در طول دوره رشد رویشی با کاهش سطح برگ و ریزش آن‌ها، منجر به کاهش شاخص سطح برگ می‌شود (Naderi et al., 2016). در راهبرد آبیاری بخشی ریشه، کاهش هدایت روزنه‌ای، حفظ شاخص کلروفیل (SPAD)، میزان فتوسنتز در سطح بالاتر، باعث جلوگیری از کاهش معنی‌دار شاخص سطح برگ و عملکرد می‌شود. در این راهبرد، درک کم‌آبی توسط سمت خشک ریشه با افزایش تولید اسید آبسزیک، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق همراه بوده و هم‌زمان جذب آب از سمت مرطوب ریشه به حفظ وضعیت آبی گیاه و ادامه رشد آن کمک می‌کند که در نهایت موجب بهبود بهره‌وری مصرف آب می‌شود (Madadi and Fallah, 2018). بین گسترش سطح برگ و میزان آب موجود در گیاه همبستگی مثبت وجود دارد، به‌طوری‌که در شرایط کمبود آب، شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد (Cakir, 2004). شاخص سطح برگ به‌طور معنی‌داری از رژیم آبیاری تأثیر می‌پذیرد و با افزایش رطوبت خاک، این شاخص افزایش یافت (Khaleghi et al., 2020). آبیاری بخشی ریشه با کاهش تعداد برگ و سطح آن، رشد برگ‌ها را به‌طور معنی‌داری کاهش داده و به این ترتیب بر رشد اندام هوایی گیاه تأثیرگذار بود (Savic et al., 2009). در پژوهشی تأثیر تنش خشکی بر خصوصیات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و عملکردی ارقام کینوا بررسی و مشاهده شد در شرایط آبیاری کامل، میانگین سطح برگ برابر با ۱۷/۸ سانتی‌متر مربع بود که در شرایط تنش متوسط به ۱۵/۹ و در تنش شدید به ۱۲/۸ سانتی‌متر مربع کاهش یافت (Al-Naggar et al., 2017). این نتایج با یافته‌های محققین دیگری نیز مطابقت داشت (Nguyen et al., 2024). آبیاری جزئی ریشه با جلوگیری از پیری زودرس برگ‌ها و کاهش ریزش آن‌ها، شاخص سطح برگ را در سطح بالاتری نسبت به کم‌آبیاری تنظیم‌شده حفظ می‌کند. کاهش سطح برگ بیشتر در کم‌آبیاری سنتی به دلیل افزایش اسید آبسزیک و بسته شدن روزنه‌ها منجر به محدود شدن فتوسنتز و نهایتاً کاهش عملکرد می‌شود، اما در PRD، کاهش سطح برگ تعدیل یافته و کارایی حفظ می‌شود (Asadi et al., 2019).

محتوای نسبی آب

یافت (Al-Naggar et al., 2017). سایر پژوهش‌ها نیز این روند را تأیید کرده‌اند به‌عنوان مثال در ذرت، در تیمار آبیاری بخشی ریشه (PRD)، ارتفاع بوته تا ۳۳/۸ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت (Sahradi and Aghayari, 2019; Savic et al., 2009). در پژوهشی دیگر، تأمین ۵۰ درصد آب مورد نیاز موجب شد ارتفاع بوته کینوا به ۴۱/۰۸ سانتی‌متر کاهش یابد، در حالی‌که ارتفاع در شرایط بدون تنش ۱۴۴/۰۲ سانتی‌متر بود (Forouzandeh et al., 2024).

شاخص سطح برگ

در این میان، تیمار آبیاری PRI1-75 و تیمار آبیاری FI بیشترین شاخص سطح برگ را به خود اختصاص دادند (جدول ۵). تیمار آبیاری PRI1-75، نه تنها کاهش در شاخص سطح برگ نداشت، بلکه با ۱/۲ درصد افزایش نسبت به تیمار شاهد، بالاترین مقدار را ثبت کرد. این یافته نشان می‌دهد که تحریک فیزیولوژیکی ناشی از تنش ملایم آبی می‌تواند در برخی موارد منجر به توسعه بیشتر سطح برگ شود، این امر احتمالاً به دلیل افزایش کارایی مصرف آب و بهبود تعادل ریشه به برگ اتفاق می‌افتد. تیمار PRI2-75 نیز نسبت به تیمار شاهد (FI) تنها ۳/۵ درصد کاهش نشان داد و تیمار FPRI-75، با ۶/۶ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد همچنان در سطحی مطلوب باقی ماند. این تیمارها از نظر آماری در گروه‌های a و ab قرار گرفتند، که نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار یا اختلاف اندک آن‌ها با شرایط آبیاری کامل است. در مقابل، کاهش سطح تأمین آب به ۵۰ درصد نیاز آبی باعث افت شدید شاخص سطح برگ شد. تیمار RD-50 با ۳۲/۳ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد، کمترین مقدار را داشت. آبیاری FPRI-50 و آبیاری PRI1-50 و PRI2-50 نیز به ترتیب با کاهش‌های ۳۰/۳، ۲۴/۸ و ۲۴/۹ درصدی، حاکی از تأثیر منفی تنش شدید رطوبتی بر گسترش سطح برگ بودند. همچنین تیمار RD-75 نیز با ۱۳/۷ درصد کاهش نسبت به تیمار آبیاری کامل، در جایگاه میانی قرار گرفت، اما نسبت به راهبردهای نوین مدیریت آبیاری در همین سطح، کارایی پایین‌تری داشت. این موضوع تأکیدی بر اهمیت انتخاب راهبرد آبیاری، نه فقط میزان آب، در مدیریت بهینه منابع آب است.

در پژوهش نادری و همکاران (Naderi et al., 2016)، کمترین شاخص سطح برگ با میانگین ۵/۱، در تیمار آبیاری

آبیاری کامل در گیاه لوبیا تحت شرایط کم‌آبی، همگی منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شوند؛ با این حال، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای کم‌آبیاری سنتی و کم‌آبیاری بخشی ریشه در سطح ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه از نظر این شاخص مشاهده نشده است (Wakrim et al., 2005). کاهش سطح آبیاری از ۹۵ به ۳۵ درصد ظرفیت زراعی، به‌طور معنی‌داری موجب کاهش محتوای نسبی آب برگ شد، به‌گونه‌ای که میانگین این شاخص از ۵۷/۱ به ۴۴/۲ درصد کاهش یافت (El-Harty et al., 2023) همچنین، با کاهش سطح آب به ۷۵ درصد نیاز آبی، مقدار محتوای نسبی آب برگ در تمامی ژنوتیپ‌ها کاهش یافته است که بیانگر تأثیر منفی خشکی بر توانایی برگ در حفظ آب می‌باشد (Saddiq et al., 2021).

اثر آبیاری بر عملکرد

عملکرد زیست‌توده (تر و خشک)

معنی‌دار شدن اثر متقابل سه‌گانه راهبرد آبیاری، رقم و مکان کاشت بر وزن تر اندام هوایی گیاه کینوا نشان‌دهنده حساسیت پاسخ عملکرد گیاه به ترکیب این سه عامل است. بررسی میانگین‌ها نشان داد که در منطقه بیرجند، رقم گیزا وان در تیمارهای کم‌آبیاری متناوب از جمله PRI1-75 و PRI2-75 بالاترین وزن تر اندام هوایی را تولید کرد و حتی نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI) عملکرد بهتری داشت، همچنان که در صفات محتوای نسبی آب برگ و شاخص سطح برگ نیز نتایج مشابهی مشاهده شد. این یافته بیانگر آن است که استفاده از راهبردهای آبیاری متناوب می‌تواند بدون کاهش عملکرد، مصرف آب را کاهش دهد. در همین منطقه، رقم تیتیکاکا نیز بهترین عملکرد را در تیمار PRI1-75 داشت و تفاوت معنی‌داری با تیمارهای FI و PRI2-75 نداشت که مؤید کارایی بالای این تیمارها حتی در رقم حساس‌تر است. در منطقه سربیشه که شرایط خاک و کیفیت آب نامساعدتر بود، رقم گیزا وان بیشترین وزن تر اندام هوایی را در تیمار PRI1-75 تولید کرد و در تیمارهای FI و PRI2-75 نیز عملکرد قابل‌قبولی داشت. اما رقم تیتیکاکا در این منطقه عملکرد پایین‌تری نشان داد و بالاترین وزن تر آن در تیمار PRI2-75 به دست آمد. کمترین مقدار نیز در تیمار RD-50 مشاهده شد که نسبت به آبیاری کامل کاهش شدیدی داشت. در مجموع، رقم گیزا وان در کلیه تیمارها و در هر دو منطقه عملکرد بالاتری نسبت به تیتیکاکا داشت. برای نمونه، در تیمار آبیاری کامل (FI) در بیرجند، عملکرد گیزا وان

بیشترین مقدار محتوای نسبی آب در تیمار آبیاری متناوب یک‌درمیان با ۷۵ درصد نیاز آبی (PRI1-75) مشاهده شد که نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI)، حدود ۰/۳۶ درصد افزایش نشان داد که اثرات آن در شاخص سطح برگ نیز مشاهده شد (جدول ۵). این افزایش از نظر عددی اندک و از نظر آماری نیز در گروه a قرار گرفت و نشان‌دهنده اثربخشی این راهبرد در حفظ رطوبت برگ با کاهش تعرق است. در مقابل، تیمار کم‌آبیاری سنتی در سطح ۵۰ درصد (RD-50)، بیشترین کاهش محتوای نسبی آب (حدود ۲۱/۴۳ درصد) را نسبت به شاهد نشان داد و در پایین‌ترین گروه آماری قرار گرفت. این امر بیانگر آن است که کاهش شدید آب آبیاری در راهبرد سنتی، منجر به افت قابل‌توجه وضعیت آبی گیاه می‌شود. از سوی دیگر، تیمارهای FPRI-75 و PRI2-75، در مقایسه با شاهد تنها ۲/۶۷ و ۳/۵۵ درصد کاهش نشان دادند، که نشان می‌دهد راهبردهای نوین کم‌آبیاری، به‌ویژه در سطوح متوسط (۷۵ درصد نیاز آبی)، می‌توانند رطوبت نسبی گیاه را در سطح قابل‌قبولی حفظ کنند. در مجموع، نتایج این بررسی حاکی از آن است که استفاده از راهبردهای کم‌آبیاری نوین، به‌ویژه تیمار PRI1-75، نه‌تنها باعث بهبود کارایی مصرف آب می‌شود، بلکه قادر است سطح رطوبت برگ را در حد مطلوبی حفظ کند. این موضوع می‌تواند در شرایط محدودیت منابع آبی، راهکاری مناسب برای دستیابی به پایداری در تولید محصولات کشاورزی باشد. در پژوهش نادری و همکاران (Naderi et al., 2016)، محتوای نسبی آب برگ‌ها از مرحله دوم نمونه‌برداری تحت‌تأثیر تیمارهای آبیاری قرار گرفت و بیشترین مقدار آن در برگ پرچم گیاهانی مشاهده شد که تحت تیمار آبیاری کامل بودند و بین تیمارهای آبیاری بخشی ریشه با تأمین ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی و تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. کاهش پتانسیل آب خاک در شرایط خشکی باعث کاهش جذب آب و در نتیجه کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود که این امر به افت هدایت روزنه‌ای و کاهش فتوسنتز منتهی می‌گردد (Martinez et al., 2007). کاهش محتوای نسبی آب در شرایط تنش خشکی و همبستگی مثبت آن با عملکرد ذرت نیز گزارش شده است (Ghazian Tafrihi et al., 2013). در شرایط کم‌آبیاری بخشی ریشه، بسته شدن روزنه‌ها موجب حفظ پتانسیل آب در بافت‌های گیاهی می‌شود (Naderi et al., 2016). نتایج حاصل از پژوهشی دیگر نشان داد که تیمارهای آبیاری شامل کم‌آبیاری بخشی ریشه، کم‌آبیاری سنتی و

در قالب راهبردهای سنتی و بدون مدیریت رطوبت خاک، می‌تواند منجر به کاهش شدید رشد و عملکرد در گیاه گردد. از این رو، در مناطق کم‌آب، استفاده از آبیاری تناوبی با شدت متوسط، گزینه‌ای مناسب و کارآمد برای پایداری تولید محسوب می‌شود. رئیس‌السادات و همکاران (Raeisi Sadat et al., 2023) طی بررسی تأثیر سیلیکون بر برخی صفات مورفولوژیکی و عملکرد اسانس مرزه تابستانی تحت تنش خشکی، مشاهده کردند با افزایش سطح تنش خشکی، وزن خشک بوته کاهش یافت و بیشترین وزن به میزان ۱/۲ گرم در هر بوته، در تیمار با ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به دست آمد. کاهش در وزن خشک اندام هوایی، نشان‌دهنده اثر منفی خشکی بر رشد گیاه است (Khaleghi et al., 2020). اسدی و همکاران (Asadi et al., 2019)، در مطالعه تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده بر صفات کمی گیاه رزماری گزارش نمودند با وجود صرفه‌جویی ۲۵ درصدی در مصرف آب، تیمار آبیاری موضعی ریشه براساس ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمار آبیاری کامل، از نظر وزن خشک اندام هوایی تفاوت معنی‌داری نداشت؛ در حالی که وزن خشک حاصل از تیمار آبیاری کامل با سایر تیمارها از جمله تیمار کم‌آبیاری سنتی براساس ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه (RD-75) تفاوت معنی‌داری نشان داد. همچنین در مطالعات متعددی گزارش شده است که تیمار آبیاری موضعی ریشه با جویچه ثابت موجب کاهش وزن اندام هوایی شد، در حالی که آبیاری موضعی با جویچه متناوب توانست این شاخص را حفظ کند (Hu et al., 2011). فروزنده و همکاران (Forouzandeh et al., 2024) نیز در بررسی پاسخ مورفوفیزیولوژیکی و عملکردی کینوا به محلول‌پاشی متیل جاسمونات و اسید سالیسیلیک تحت تنش خشکی، بیان داشتند که مقدار ماده خشک کل نیز تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت، به طوری که در شرایط بدون تنش، این مقدار برابر با ۴۷۹/۳ گرم در مترمربع بود، اما در شرایط تنش شدید به ۱۳۳/۸ گرم در مترمربع رسید. در بررسی اثر متقابل ژنوتیپ و محیط در رژیم‌های مختلف آبی و پاسخ کینوا به فصل کشت، مشاهده شد شرایط غرقابی و تنش خشکی هر دو باعث کاهش وزن خشک بوته کینوا گردیدند (Nguyen et al., 2024). کاهش وزن خشک به دلیل کم‌آبیاری به طور عمده ناشی از تأثیر سوء تنش بر رشد و فیزیولوژی گیاه است؛ چنانچه تنش در مرحله رشد رویشی واقع شود، کاهش میزان شاخه‌های فرعی عامل اصلی افت وزن خشک است و وقوع

حدود ۳۷/۰۸ درصد بیشتر از تیتیکاکا بود. بهترین عملکرد در سربیشه مربوط به رقم گیزا وان و در سطح آبیاری-PR11-75 حاصل شد که ۱۵/۱ درصد بیشتر از آبیاری کامل (FI) در همین رقم در منطقه سربیشه بود. مقایسه بین دو مکان کاشت نیز بیانگر آن بود که در اغلب تیمارها، عملکرد اندام هوایی در بیرجند بیشتر از سربیشه بود. این تفاوت می‌تواند به شرایط مناسب‌تر خاک و کیفیت بهتر آب آبیاری در بیرجند نسبت داده شود (جدول ۴).

اثر نوع آبیاری بر وزن خشک بوته‌ی گیاه کینوا بیانگر آن است که راهبردهای مختلف مدیریت آبیاری، تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر رشد رویشی و تجمع ماده خشک در گیاه دارند. در این بررسی، تیمار آبیاری کامل (FI)، به‌عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته شد (جدول ۵). در میان تیمارها، بالاترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمارهای PR11-75 و PR12-75 بود. این دو تیمار به ترتیب موجب افزایش ۴/۰۷ درصدی و ۳/۵۹ درصدی در وزن خشک بوته نسبت به شاهد شدند، که نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای راهبردهای آبیاری متناوب در حفظ محتوای رطوبت گیاه و بهبود رشد آن تحت کاهش نسبی و کنترل شده آب مصرفی در مزرعه است. در مقابل، کمترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمارهای RD-50 و FPRI-50 بود، که به ترتیب باعث کاهش ۳۹/۴۱ درصدی و ۳۶/۸ درصدی در وزن خشک بوته نسبت به آبیاری کامل شدند. این کاهش چشمگیر، نشان‌دهنده‌ی حساسیت رشد گیاه به کم آبی شدید، به‌ویژه در راهبردهای غیرهوشمند و سنتی است. تیمارهای RD-75 و FPRI-75 نیز نسبت به شاهد به ترتیب با کاهش ۱۳/۱ درصدی و ۱۰/۲ درصدی همراه بودند. این مقدار کاهش، هرچند نسبت به سطوح ۵۰ درصد ملایم‌تر بود، اما باز هم از افت نسبی رشد حکایت دارد. در راهبردهای کم‌آبیاری یک‌درمیان با ۵۰ درصد نیاز آبی، کاهش وزن خشک بوته نسبت به آبیاری کامل به ترتیب ۲۱/۱۱ درصد (در PR11-50) و ۲۳/۱ درصد (در PR12-50) بود. هرچند این دو تیمار نیز با کاهش عملکرد مواجه بودند، اما نتایج آن‌ها نسبت به راهبردهای سنتی مشابه (RD-50 و FPRI-50) بهتر بوده و عملکرد مطلوب‌تری ارائه دادند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال کم‌آبیاری متناوب در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی نه تنها باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب می‌شود، بلکه می‌تواند عملکرد وزن خشک گیاه را حفظ یا حتی بهبود بخشد. در مقابل، کاهش افراطی آب آبیاری به‌ویژه

جدول ۴. اثر متقابل سه‌گانه مکان کاشت، رقم و نوع آبیاری بر وزن تر اندام هوایی در بوته کینوا (گرم)

Table 4. Triple interaction effect of planting location, cultivar and irrigation type on shoot quinoa fresh weight (gr)

راهبرد آبیاری Irrigation method	Sarbisheh سریشه		Birjand بیرجند	
	گیزا وان Giza1	تیتیکاکا Titicaca	گیزا وان Giza1	تیتیکاکا Titicaca
FI	100.75 ^{def}	74.75 ^{hijk}	153.81 ^a	112.20 ^{cde}
RD-75	68.96 ^{ijkl}	52.69 ^{lmno}	109.90 ^{cde}	83.35 ^{ghi}
RD-50	35.82 ^{pq}	26.28 ^q	73.36 ^{hijk}	47.85 ^{op}
FPRI-75	104.43 ^{de}	51.79 ^{mno}	133.80 ^b	99.13 ^{efg}
FPRI-50	60.36 ^{klmno}	29.30 ^q	86.90 ^{fgh}	49.42 ^{nop}
PRI1-75	115.94 ^{cd}	67.06 ^{ijklm}	161.20 ^a	122.59 ^{bc}
PRI1-50	76.80 ^{hij}	50.32 ^{nop}	103.54 ^{de}	79.98 ^{hij}
PRI2-75	97.99 ^{efg}	78.97 ^{hij}	163.41 ^a	110.53 ^{cde}
PRI2-50	64.98 ^{jklmn}	49.90 ^{nop}	114.05 ^{cde}	69.31 ^{ijk}

میانگین‌های دارای حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ براساس آزمون FLSD می‌باشد. FI: آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیازآبی گیاه (شاهد)، RD-75 و RD-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به صورت سنتی، FPRI-75 و FPRI-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به روش خشکی موضعی ریشه به صورت ثابت، PRI1-75 و PRI1-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از یک دوره آبیاری، PRI2-75 و PRI2-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از دو دوره آبیاری

Means followed by the similar letters are not significantly different at the 5% probability level using FLSD.

FI: Irrigation based on 100% of the crop water requirement (control treatment), RD-75 and RD-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using the conventional irrigation method, FPRI-75 and FPRI-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using fixed partial root-zone irrigation (fixed PRI), PRI1-75 and PRI1-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after one irrigation cycle, PRI2-75 and PRI2-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after two irrigation cycles

به FI داشت. این نتایج بیانگر آن است که کاهش متوسط میزان آب آبیاری، همراه با اعمال خشکی موضعی متناوب در ناحیه ریشه، می‌تواند از طریق بهبود کارایی مصرف آب منجر به حفظ یا حتی افزایش عملکرد دانه شود. تیمار PRI2-75 نیز عملکرد نسبتاً بالایی را نشان داد؛ به طوری که در رقم تیتیکاکا افزایش ۹/۸ درصدی عملکرد نسبت به FI مشاهده شد و در رقم گیزاوان عملکردی تقریباً مشابه تیمار آبیاری کامل به دست آمد. به نظر می‌رسد کاهش دفعات آبیاری همراه با حفظ رطوبت مناسب در بخشی از سیستم ریشه در این تیمار، موجب تداوم فعالیت فتوسنتزی و رشد مطلوب گیاه شده است. در مقابل، RD-50 بیشترین کاهش عملکرد را در هر دو رقم ایجاد کرد؛ به طوری که عملکرد دانه در تیتیکاکا و گیزاوان به ترتیب ۴۸/۲ و ۶۲/۲ درصد نسبت به

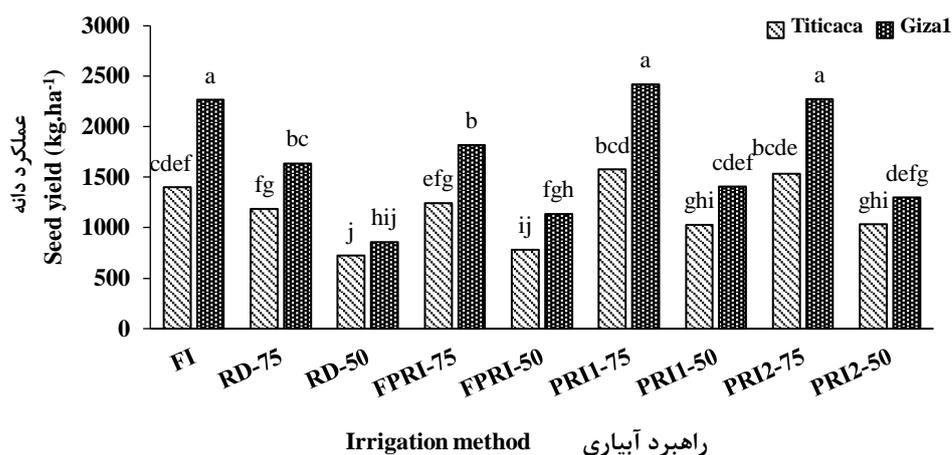
تنش در مراحل پر شدن دانه، با کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌های در حال توسعه، باعث افت بیشتر ماده خشک می‌شود (Jamali and Kolahchi, 2020).

عملکرد دانه

نتایج اثر متقابل رژیم‌های آبیاری و رقم کینوا نشان داد که هر دو رقم در پاسخ به سطوح مختلف تأمین آب، الگوهای واکنشی متفاوتی از خود نشان دادند که از نظر آماری نیز معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد دانه در هر دو رقم در تیمار PRI1-75 حاصل شد. در این تیمار، عملکرد دانه رقم تیتیکاکا به ۱۵۷۶/۴ کیلوگرم در هکتار رسید که نسبت به تیمار آبیاری کامل (FI) افزایشی معادل ۱۲/۷ درصد را نشان داد، در حالی که رقم گیزاوان، افزایشی برابر با ۶/۸ درصد نسبت

در استفاده از منابع، تحمل نسبی به تنش‌های محیطی، توسعه مناسب‌تر سیستم ریشه و توانایی بیشتر در پرکردن دانه باشد. با این حال، کاهش شدیدتر عملکرد این رقم تحت محدودیت شدید آب نشان می‌دهد که مدیریت دقیق آبیاری برای بهره‌برداری بهینه از پتانسیل آن ضروری است. بر این اساس، در شرایط محدودیت متوسط آب، کشت رقم گیزاوان همراه با تیمارهای PRI1-75 یا PRI2-75 به عنوان گزینه‌ای مناسب توصیه می‌شود؛ در حالی که در شرایط کم‌آبی شدید، رقم تیتیکاکا به دلیل کاهش عملکرد کمتر، گزینه‌ای پایدارتر محسوب می‌شود، هرچند عملکرد مطلق آن پایین‌تر از رقم گیزاوان است. به طور کلی، راهبرد خشکی موضعی ریشه متناوب نسبت به خشکی موضعی ثابت و کم‌آبیاری متداول، برتری قابل توجهی در حفظ عملکرد دانه نشان داد (شکل ۱).

تیمار FI کاهش یافت. همچنین، تیمار FPRI-50 موجب کاهش ۴۴/۰ درصدی عملکرد در رقم تیتیکاکا و ۴۹/۹ درصدی در رقم گیزاوان شد. این افت شدید عملکرد را می‌توان به اعمال تنش شدید کم‌آبی، کاهش جذب آب و عناصر غذایی، افت شاخص سطح برگ، کاهش نرخ فتوسنتز و در نهایت اختلال در فرایند پر شدن دانه نسبت داد. نکته قابل توجه آن است که در برخی تیمارهای ۵۰ درصد نیاز آبی، کاهش عملکرد رقم گیزاوان بیش از تیتیکاکا بود (مانند تیمار RD-50) که نشان می‌دهد اگرچه رقم گیزاوان در شرایط تأمین آب مطلوب از پتانسیل عملکرد بالاتری برخوردار است، اما در مواجهه با تنش شدید کم‌آبی حساس‌تر عمل می‌کند. به طور کلی و مستقل از تیمار آبیاری، میانگین عملکرد دانه رقم گیزاوان در تمامی شرایط بالاتر از رقم تیتیکاکا بود. این برتری می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ژنتیکی مانند کارایی بالاتر



شکل ۱. اثر متقابل راهبرد آبیاری و رقم بر عملکرد دانه کینوا. FI: آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (شاهد)، RD-75 و RD-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به روش خشکی موضعی ریشه به صورت ثابت، PRI1-75 و PRI1-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از یک دوره آبیاری، PRI2-75 و PRI2-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از دو دوره آبیاری

Fig.1. Intraction effect of irrigation method and cultivar on seed yield. FI: Irrigation based on 100% of the crop water requirement (control treatment), RD-75 and RD-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using the conventional irrigation method, FPRI-75 and FPRI-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using fixed partial root-zone . irrigation (fixed PRI), PRI1-75 and PRI1-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after one irrigation cycle, PRI2-75 and PRI2-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after two irrigation cycles.

سیگنال‌های هورمونی به‌ویژه اسید آبسزیک از ریشه به اندام‌های هوایی گیاه است (Wan et al., 2023). نتایج مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد استفاده از آبیاری بخشی

راهبرد آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) در مقایسه با کم‌آبیاری متداول (DI) توان بیشتری در حفظ رطوبت خاک نشان می‌دهد که این موضوع احتمالاً ناشی از انتقال قوی‌تر

بیشتر برای جذب نور شود، اما به دلیل احتمال خوابیدگی در کینوا، باید همراه با ساختار قوی و عملکرد مناسب ساقه باشد. همچنین مشاهده شد که ارتفاع رقم تیتیکاکا در شرایط تنش، به کمتر از ۲۰ سانتی‌متر رسید (Nguyen et al., 2024).

تفاوت‌های مکانی نیز تأثیر چشمگیری بر ارتفاع گیاه داشت، به طوری که ارتفاع بوته‌های کینوا در بیرجند حدود ۲۲/۰۶ درصد بیشتر از سربیشه بود (جدول ۶). این تفاوت احتمالاً به شرایط خصوصیات خاک، اقلیم منطقه و علی‌الخصوص کیفیت بهتر آب بیرجند باز می‌گردد. در سربیشه، شوری بالای خاک و آب می‌تواند سبب کاهش توان جذب آب و مواد غذایی شده و در نهایت به افت رشد گیاه منجر گردد. حضور نمک‌های محلول در ناحیه ریشه علاوه بر کاهش پتانسیل اسمزی، جذب سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها را مختل نموده و این واقعیت به وضوح در نتایج آماری نیز بازتاب یافته است.

رقم گیزا وان دارای بیشترین شاخص سطح برگ بود، در حالی که رقم تیتیکاکا در رتبه پایین تری قرار گرفت. بر این اساس، شاخص سطح برگ رقم گیزا وان حدود ۱/۲ برابر (با ۱۹/۹ درصد) بیشتر از رقم تیتیکاکا بود (جدول ۶). این برتری می‌تواند به ویژگی‌های ژنتیکی رقم گیزا وان در توسعه بهتر سطح برگ، جذب مؤثرتر منابع و تحمل بالاتر نسبت به شرایط محیطی بازگردد. یافته‌های حاضر با مطالعات پیشین نیز هم‌راستا است. به عنوان مثال، پاپن و همکاران (Papan et al., 2023) بالاترین مقدار شاخص سطح برگ را در رقم گیزا وان گزارش کردند. در پژوهش‌های متعددی، وجود تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های کینوا از نظر شاخص سطح برگ به صورت آماری گزارش شده است (Sajjad et al., 2014; Al-Naggar et al., 2017). شاخص سطح برگ در رقم گیزا وان تحت شرایط آبیاری کامل بیشتر از رقم تیتیکاکا گزارش شده که این موضوع بیانگر ظرفیت ژنتیکی بالاتر این رقم در تولید سطح برگ است (Golestanifar et al., 2024).

مکان کشت نیز اثر معناداری بر شاخص سطح برگ نشان داد. میانگین شاخص سطح برگ در منطقه بیرجند بالاتر از سربیشه بود. این اختلاف نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ در بیرجند حدود ۱/۲۱ برابر (یا ۲۰/۸ درصد بیشتر) از سربیشه بود. این تفاوت می‌تواند به شرایط محیطی مساعدتر بیرجند مربوط باشد، از جمله کیفیت بهتر آب آبیاری، شوری کمتر و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطلوبتر خاک که به توسعه بهتر برگ‌ها و گسترش سطح فتوسنتزی کمک

یک‌درمیان متناوب، ضمن حفظ عملکرد دانه، موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب شده و می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر برای بهبود کارایی آب در تولید ذرت مورد توجه قرار گیرد (Sahradi and Fayyaz Aghayari, 2019). مقایسه تیمارهای مختلف آبیاری شامل آبیاری کامل، کم‌آبیاری و آبیاری بخشی منطقه ریشه نشان داد که این راهبردها از نظر عملکرد محصول اختلاف معنی‌داری دارند؛ به طوری که محدودیت شدید آب در تیمارهای کم‌آبیاری باعث کاهش عملکرد شد، در حالی که اجرای راهبرد PRD اثر مثبت و مطلوبی بر تولید محصول داشت (Abdelraouf and Ragab, 2018). همچنین گزارش شده است که بروز تنش خشکی در مرحله پر شدن دانه موجب کاهش فتوسنتز و افت عملکرد دانه در واحد سطح می‌شود و چنانچه این تنش با افزایش دما همراه باشد، با تسریع پیری برگ‌ها، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و کاهش وزن متوسط دانه‌ها، عملکرد نهایی محصول کاهش می‌یابد (Clarke et al., 1984).

مطالعات نشان داده‌اند که بیشترین عملکرد دانه، معادل ۴۳۳۴ کیلوگرم در هکتار، در رقم تیتیکاکا تحت آبیاری کامل حاصل شده است، در حالی که رقم گیزا وان تحت تنش کم‌آبی ۵۰٪ نیاز آبی، کمترین عملکرد را با ۷۶۰ کیلوگرم در هکتار نشان داد (Kazemi et al., 2020). کاهش دسترسی به آب اثر منفی قابل توجهی بر اجزای عملکرد، شامل عملکرد دانه در واحد سطح، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع گیاه و وزن هزار دانه دارد و موجب کاهش کلی عملکرد می‌شود. به این ترتیب، مواجهه با تنش خشکی در هر مرحله رشد باعث افت عملکرد ارقام تیتیکاکا و گیزا وان می‌گردد (Kazemi et al., 2020). علاوه بر این، مطالعات دیگر نشان داده‌اند که رقم تیتیکاکا در مقایسه با گیزا وان عملکرد بالاتری با ۲۷۲۷ کیلوگرم در هکتار دارد، در حالی که عملکرد رقم گیزا وان برابر با ۲۵۰۵ کیلوگرم در هکتار بود (Keshtkar et al., 2021).

اثرات رقم و مکان بر اجزای عملکرد و رشد

ارتفاع رقم گیزا وان، ۱۰/۰۴ درصد بلندتر از رقم تیتیکاکا بود (جدول ۶)، که می‌تواند ناشی از کارایی بالاتر ژنتیکی گیزا وان در جذب آب و عناصر غذایی باشد. در پژوهشی دیگر رقم گیزا وان را با میانگین ارتفاع ۱۲۳/۳۸ سانتی‌متر به عنوان بلندترین رقم معرفی شد (Mansouri et al., 2023). باقری و همکاران (Bagheri et al., 2021)، کمترین ارتفاع را برای تیتیکاکا گزارش کردند. اگرچه ارتفاع زیاد ممکن است باعث رقابت

محیطی نسبت داده شود. (Nguyen et al., 2024;)
(Shonga, 2020; Voronov et al., 2023).

میانگین وزن خشک اندام هوایی در سربیشه، حدود ۲۵ درصد کمتر از بیرجند بود (جدول ۶). این کاهش می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی نامساعدتر، خاک شورتر یا محدودیت‌های آبی بیشتر در منطقه سربیشه باشد که رشد اندام‌های هوایی و در نهایت انباشت ماده خشک را کاهش داده است. در ارزیابی رشد و عملکرد ژنوتیپ‌های کینوا در شمال تانزانیا مشاهده شد که محیط تأثیر قابل توجهی بر وزن خشک بوته داشت؛ به‌ویژه در مکان NM-AIST که دارای خاک رسی-لومی با pH مناسب بود، ژنوتیپ‌ها وزن خشک بیشتری نسبت به مکان Kibosho با خاک اسیدی‌تر و بافت سنی تولید کردند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب ژنوتیپ مناسب با توجه به شرایط اکولوژیکی محل کشت را مورد تأکید قرار می‌دهند (Shonga, 2020).

نتایج حاصل از تجزیه اثر اصلی مکان حاکی از وجود تفاوت معنی‌دار در میانگین عملکرد دانه کینوا بین دو محل اجرای آزمایش بود. به‌طوری که بالاترین میزان عملکرد دانه در بیرجند مشاهده شد، در حالی که عملکرد دانه در سربیشه محدود گردید که نشان‌دهنده برتری حدود ۲۰/۴ درصدی مکان بیرجند نسبت به سربیشه است. این اختلاف عملکرد می‌تواند ناشی از مناسب‌تر بودن شرایط اقلیمی، مدیریت زراعی کارآمدتر، وضعیت مطلوب‌تر خاک از نظر بافت و حاصلخیزی و همچنین یکنواختی بیشتر در توزیع آب آبیاری در بیرجند باشد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأیید می‌کند که موقعیت مکانی کشت از عوامل مؤثر و تعیین‌کننده در عملکرد کینوا به شمار می‌رود و انتخاب محل مناسب کشت باید بر اساس ویژگی‌های محیطی و مدیریتی هر منطقه صورت گیرد. افزون بر این، یافته‌ها بر لزوم تطبیق راهکارهای آبیاری و مدیریت تغذیه‌ای با شرایط خاص هر مکان به‌منظور دستیابی به عملکرد مطلوب و پایدار تأکید دارد (جدول ۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات محیطی ناشی از محل استقرار آزمایش، نقش تعیین‌کننده‌ای در نوسان عملکرد دانه ایفا می‌کند. در این میان، اختلاف معنی‌داری میان مناطق مختلف گزارش شده؛ به‌گونه‌ای که بالاترین سطح عملکرد دانه در شرایط اقلیمی شهرکرد و کمترین مقدار آن در منطقه کرج ثبت گردیده است که بیانگر وابستگی شدید این صفت به ویژگی‌های بوم‌شناختی محل کشت است (Bagheri et al.,)

می‌کنند. این نتایج بیانگر آن است که نه‌تنها ویژگی‌های ژنتیکی، بلکه شرایط محیطی محل کشت نیز در توسعه سطح برگ نقش بسزایی دارد. این نتایج با دیگر پژوهش‌ها مطابقت داشت (Golestanifar et al., 2024).

رطوبت نسبی برگ در رقم گیزا وان ۵/۶ درصد بیشتر از رقم تیتیکاکا بود (جدول ۶). نتایج به‌دست‌آمده که نشان‌دهنده تفاوت در واکنش ژنوتیپ‌ها به شرایط محیطی است که با یافته‌های پیشین هم‌راستا بوده است (Mansouri et al.,) (2023; Saddiq et al., 2021; El-Harty et al., 2023).

محتوای رطوبت نسبی برگ در منطقه بیرجند نسبت به منطقه سربیشه (مختاران) حدود ۹/۰۰ درصد بیشتر بود، که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های محیطی و اقلیمی بین دو منطقه باشد (جدول ۶). در بیرجند به دلیل EC پایین‌تر آب آبیاری و خاک، جذب عناصر کلیدی مانند پتاسیم و کلسیم بهبود یافته و فشار اسمزی سلول‌ها حفظ گردید. پتاسیم در تنظیم باز و بسته‌شدن روزنه‌ها و تعادل یونی سلول‌های نگهبان نقش محوری دارد، از این رو در شرایط کم‌آبیاری بخشی ریشه که نوسانات رطوبتی وجود دارد، پتاسیم نقش اصلی در حفظ وضعیت آبی برگ‌ها ایفا می‌کند. در آزمایشی که به مطالعه تاثیر پرایمینگ بذر بر برخی صفات فیزیولوژیکی سه رقم کینوا تحت رژیم‌های مختلف آبیاری پرداخت، مشاهده شد که رطوبت نسبی برگ در منطقه نیشابور به‌طور معنی‌داری بیشتر از کاشمر بود؛ این اختلاف می‌تواند به شرایط متفاوت اقلیمی، از جمله رطوبت نسبی هوا، دمای منطقه و ویژگی‌های فیزیکی و بافت خاک مرتبط باشد (Shadmehri and) (Abbasdokht, 2024).

معنی‌دار شدن اثر رقم بر وزن خشک اندام هوایی بیانگر تفاوت‌های ژنتیکی مهم بین ارقام مورد بررسی در توانایی تولید ماده خشک است. رقم گیزا وان، نسبت به رقم تیتیکاکا وزن اندام هوایی بالاتری داشت (جدول ۶). در واقع، این صفت در رقم گیزا وان، حدود ۱/۳۷ برابر بیشتر از رقم تیتیکاکا بود. این افزایش قابل توجه نشان‌دهنده‌ی توان ژنتیکی بالاتر گیزا وان در انباشت زیست‌توده و رشد رویشی بهتر تحت شرایط آزمایشی است. تفاوت ژنتیکی میان ژنوتیپ‌ها در تولید وزن خشک می‌تواند به ویژگی‌هایی مانند سطح برگ بالاتر، توسعه ریشه قوی‌تر، کارایی بیشتر جذب آب و مواد غذایی، طول دوره رشد مناسب‌تر و همچنین سازگاری بهتر با تنش‌های

فراهم کرد، اما در منطقه پولمن با رژیم رطوبتی محدودتر و دمای بالاتر، کاهش قابل توجهی در عملکرد دانه مشاهده شد و ژنوتیپ‌های حساس به تنش گرمایی واکنش منفی نشان دادند.

شاخص برداشت در دو رقم کینوا متفاوت بود و این تفاوت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گزارش شد. رقم گیزاوان، شاخص برداشت بهتری نسبت به رقم تیتیکاکا داشت. این اختلاف نشان می‌دهد که گیزاوان توانایی بالاتری در تخصیص ماده خشک تولیدی به دانه دارد. شاخص برداشت بالاتر در گیزاوان می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ژنتیکی آن باشد که باعث افزایش کارایی استفاده از منابع فتوسنتزی، انتقال بهتر محصولات فتوسنتزی و دوره رشد مناسب‌تر می‌شود و در نهایت منجر به افزایش بازده دانه‌زایی شده است (جدول ۶). این نتایج با پژوهش‌های دیگران مطابقت داشت (Beltrán et al., 2019; Fazeli et al., 2022).

2021). مطابق گزارش مالیرو (Maliro, 2017)، عملکرد دانه حاصل برهم‌کنش پیچیده ژنوتیپ و محیط بوده و تفاوت‌های مشاهده‌شده در مکان‌های مختلف عمدتاً به نوسانات دمایی و شرایط اقلیمی حاکم بر هر منطقه نسبت داده می‌شود. نتایج پژوهش تان و تمل (Tan and Temel, 2018) نیز اختلاف معنی‌دار عملکرد دانه را بین دو منطقه ایغدیر و ارزروم تأیید کرد، به طوری که در منطقه ایغدیر با اقلیم گرم‌تر و دوره رشد طولانی‌تر، رقم Q-52 بیشترین میزان عملکرد (۳۶۷۹/۶ کیلوگرم در هکتار) را نشان داد، در حالی که در شرایط سردتر ارزروم، میزان عملکرد به ۹۷۹/۸ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت. علاوه بر این، یافته‌های بلتران (Beltrán et al., 2020) بر نقش غالب عوامل محیطی در تعیین عملکرد دانه تأکید دارد. بر اساس گزارش هینوجوسا (Hinojosa et al., 2019)، محیط مان‌ورنون به دلیل برخورداری از رطوبت مطلوب‌تر، شرایط مناسب‌تری برای دستیابی به عملکرد بالاتر

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات ساده راهبرد آبیاری بر برخی صفات رشدی کینوا

Table 5. Mean comparison of irrigation strategy on some growth parameters of Quinoa

راهبرد آبیاری Irrigation method	وزن تر اندام هوایی Shoot Fresh Weight g	وزن خشک اندام هوایی Shoot Dry Weight g	ارتفاع Height cm	محتوای نسبی آب برگ Relative Water Content %	شاخص سطح برگ Leaf Area Index
FI	110.379 ^a	37.149 ^a	92.192 ^a	77.978 ^{ab}	7.099 ^a
RD-75	78.723 ^c	32.282 ^c	78.806 ^{bc}	71.172 ^{cd}	6.13 ^{bc}
RD-50	45.827 ^e	22.509 ^e	66.108 ^e	61.262 ^e	4.73 ^d
FPRI-75	97.287 ^b	33.337 ^b	80.663 ^{bc}	75.907 ^{abc}	6.62 ^{ab}
FPRI-50	56.498 ^d	23.465 ^d	70.986 ^{de}	69.039 ^d	4.94 ^d
PRI1-75	116.699 ^a	38.662 ^a	82.394 ^{bc}	78.261 ^a	7.18 ^a
PRI1-50	77.66 ^c	29.311 ^c	76.808 ^{cd}	71.231 ^{cd}	5.34 ^{cd}
PRI2-75	112.727 ^a	38.485 ^a	83.65 ^b	75.205 ^{abcd}	6.84 ^{ab}
PRI2-50	74.56 ^c	28.536 ^c	77.641 ^c	71.762 ^{bcd}	5.33 ^{cd}

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر مکان و رقم، براساس آزمون FLSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ هستند.

FI: آبیاری براساس ۱۰۰ درصد نیازآبی گیاه (شاهد)، RD-75 و RD-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به صورت سنتی، FPRI-75 و FPRI-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به روش خشکی موضعی ریشه به صورت ثابت، PRI1-75 و PRI1-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از یک دوره آبیاری، PRI2-75 و PRI2-50: آبیاری براساس ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه بطور متناوب در طرفین پشته بعد از دو دوره آبیاری

In each column the means with the same letters at each location and cultivar, are not significantly different based on the FLSD test at the 0.05 probability level.

FI: Irrigation based on 100% of the crop water requirement (control treatment), RD-75 and RD-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using the conventional irrigation method, FPRI-75 and FPRI-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using fixed partial root-zone irrigation (fixed PRI), PRI1-75 and PRI1-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after one irrigation cycle, PRI2-75 and PRI2-50: Irrigation based on 75% and 50% of the crop water requirement, respectively, using alternate partial root-zone irrigation, with alternation between ridge sides after two irrigation cycles

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرات ساده مکان کاشت و رقم بر برخی صفات رشدی کینوا

Table 6. Mean comparison of location and cultivar on some growth parameters of Quinoa

تیمار Treatment	شاخص برداشت Harvest Index	عملکرد دانه Seed Yield	ارتفاع Height	محتوای نسبی		وزن خشک	وزن تر
				آب برگ RWC	شاخص سطح برگ LAI	اندام هوایی Shoot dry weight	اندام هوایی Shoot fresh weight
منطقه Location	بیرجند Birjand	1585.62 ^a	86.64 ^a	75.54 ^a	6.59 ^a	36.012 ^a	104.13 ^a
	سربیشه Sarbisheh	1262.03 ^b	70.96 ^b	69.30 ^b	5.45 ^b	27.04 ^b	67.061 ^b
رقم Cultivar	Titicaca	13.6716 ^b	75.036 ^b	70.46 ^b	5.48 ^b	28.25 ^b	69.74 ^b
	Giza1	15.4658 ^a	82.575 ^a	74.38 ^a	6.57 ^a	34.79 ^a	101.44 ^a

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر مکان و رقم، براساس آزمون FLSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

In each column the means with the same letters at each location and cultivar, are not significantly different based on the FLSD test at the 0.05 probability level.

همبستگی صفات

در بهبود عملکرد و انتخاب ژنوتیپ‌های برتر در برنامه‌های به‌نژادی و مدیریت زراعی موردتوجه قرار گیرند (جدول ۷). تجزیه همبستگی نشان داد که عملکرد دانه در ژنوتیپ‌های گندم دوروم به طور مثبت و معنی‌دار با عملکرد بیولوژیک و شاخص برداشت مرتبط است که بیانگر اهمیت حفظ رشد رویشی مؤثر و کارایی تخصیص ماده خشک به دانه برای افزایش عملکرد نهایی، به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، است. ارتفاع بوته تنها در شرایط تنش زودهنگام با عملکرد دانه همبستگی مثبت داشت، درحالی‌که صفات مرتبط با طول دوره رشد همبستگی منفی (هرچند غیرمعنی‌دار) نشان دادند که زودرسی و فرار از تنش خشکی نقش مهمی در مناطق خشک دارد (Bogale and Tesfaye, 2016). در پژوهش دیگر عملکرد بیولوژیک همبستگی مثبت با عملکرد دانه، ارتفاع داشت. شاخص برداشت نیز با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت، ولی با شاخص برداشت همبستگی معنی‌دار نداشت (Moosavi et al., 2020).

نتیجه‌گیری نهایی

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر انواع راهبردهای آبیاری موضعی ریشه (PRI) و مقایسه آن با کم‌آبیاری سنتی و آبیاری کامل روی صفات رشدی و فیزیولوژیکی دو رقم کینوا (تیتیکاکا و گیزا وان) در شرایط اقلیمی شرق ایران انجام شد. نتایج نشان داد تیمارهای آبیاری موضعی ریشه به‌صورت متناوب، به‌ویژه در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی (PRI1-75) و (PRI2-75)، با حفظ یا افزایش معنی‌دار برخی شاخص‌های رشدی همچون وزن تر و خشک بوته، شاخص سطح برگ (LAI) و محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار شاهد،

نتایج تجزیه همبستگی نشان داد که اغلب صفات رشدی مورد بررسی با یکدیگر و با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند. وزن تر اندام هوایی با وزن خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد دانه همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار نشان داد که بیانگر نقش مؤثر افزایش زیست‌توده هوایی در بهبود عملکرد دانه است. وزن خشک اندام هوایی نیز با شاخص سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت که نشان‌دهنده اهمیت تجمع ماده خشک در افزایش توان تولیدی گیاه می‌باشد. شاخص سطح برگ با محتوای نسبی آب برگ، ارتفاع گیاه و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد که حاکی از نقش سطح فتوسنتزی بیشتر در افزایش تولید دانه است. محتوای نسبی آب برگ نیز با ارتفاع گیاه و عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت که بیانگر تأثیر وضعیت مناسب آبی گیاه بر رشد و عملکرد است. همچنین، ارتفاع گیاه با عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان داد. در مقابل، شاخص برداشت با اغلب صفات رشدی همبستگی معنی‌دار نداشت، اما با عملکرد دانه همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار نشان داد که بیانگر نقش مستقیم کارایی تخصیص ماده خشک به دانه در افزایش عملکرد است. بر اساس نتایج این جدول، صفات وزن تر و خشک اندام هوایی، شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاه بیشترین ارتباط را با عملکرد دانه نشان دادند و می‌توانند به‌عنوان صفات کلیدی

خصوصاً در منطقه بیرجند که شرایط خاک و آب برای رشد کینوا مناسب‌تر بود. این موضوع اهمیت انتخاب و به‌نژادی ارقام سازگار و پرتانسیل را (در کنار مدیریت مناسب آبیاری) برجسته می‌سازد. نتایج آماری تحلیل واریانس صفات نیز نشان داد که عامل راهبرد آبیاری، اثر شدید و معنی‌داری بر ویژگی‌های رشدی بوته کینوا اعمال کرد. از همه مهم‌تر، در برخی از موارد، تیمار PRI در سطح ۷۵٪ نیاز آبی مقادیری فراتر از تیمار شاهد ثبت نمود که نشان‌دهنده پدیدهٔ تحریک رشدی به‌واسطه‌ی تنش ملایم، افزایش پویایی ریشه و بهبود رابطه برگ به ریشه است.

باتوجه به محدودیت منابع آبی، انتخاب تیمار آبیاری موضعی ریشه (PRI) به‌صورت متناوب و با سیکل‌های مدیریتی مناسب (به‌ویژه استفاده بعد از یک یا دو دوره آبیاری) همراه با ارقام مقاوم و پرتانسیل مانند گیزا وان، می‌تواند راهبردی عملی و اجرایی برای پایداری تولید و صرفه‌جویی مؤثر در مصرف آب اراضی کشاورزی خراسان جنوبی و مناطق مشابه محسوب شود.

موجب بهینه‌سازی مصرف آب بدون افت قابل‌توجه در رشد گیاه شدند و این افزایش رشد نهایتاً به افزایش عملکرد دانه منجر گردید. این موفقیت عمدتاً ناشی از تحریک ملایم مکانیسم‌های دفاعی و سازگاری گیاه، از جمله القای بسته‌شدن نسبی روزنه‌ها توسط سیگنال هورمونی (ABA) و تقویت تعادل رشد ریشه به برگ تحت شرایط رطوبتی متناوب ریشه بود. از منظر فیزیولوژیکی، آبیاری متناوب دو طرف ریشه باعث می‌شود گیاه به‌جای ورود به فاز تنش شدید، تنها با یک استرس کنترل‌شده روبرو شود که ضمن کاهش تبخیر و افزایش بهره‌وری مصرف آب، عملکرد رشدی نظیر شاخص سطح برگ و زیست‌توده هوایی به‌خوبی حفظ گردد. برخلاف آن، کم‌آبیاری سنتی با کاهش ۵۰ درصد نیاز آبی (RD-50) موجب افت معنی‌دار همهٔ صفات رشدی و خصوصاً کاهش شدید وزن گیاه شد که نشان از عدم کارآمدی این رویکرد به‌ویژه در مناطق با کمبود منابع آب دارد. همچنین مشاهده گردید که رقم گیزا وان به‌طورکلی در محیط‌های مختلف، به‌واسطه‌ی ارتفاع و زیست‌توده بیشتر و کارایی جذب عناصر غذایی و آب بالا، عملکرد بهتری نسبت به تیتیکاکا نشان داد

جدول ۷. همبستگی بین صفات رشدی و عملکرد دانه

Table 7. Correlation analysis between growth traits and seed yield

		1	2	3	4	5	6	7	
1	Fresh weight	وزن تر اندام هوایی	1						
2	Dry weight	وزن خشک اندام هوایی	0.686**	1					
3	LAI	شاخص سطح برگ	0.701**	0.664**	1				
4	RWC	محتوای نسبی آب برگ	0.617**	0.543**	0.491**	1			
5	Height	ارتفاع	0.773**	0.647**	0.599**	0.524**	1		
6	Seed Yield	عملکرد دانه	0.835**	0.788**	0.723**	0.562**	0.673**	1	
7	Harvest Index	شاخص برداشت	0.129 ^{ns}	0.023 ^{ns}	0.309**	0.172 ^{ns}	0.181 ^{ns}	0.505**	1

* و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ را نشان می‌دهد.

* and ** indicate non-significance and significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

منابع

- Abdelraouf, R.E., Ragab, R., 2018. Applying partial root drying drip irrigation in the presence of organic mulching. Is that the best irrigation practice for arid regions? Field and modelling study using the Saltmed model. *Irrigation and Drainage*. 67(4), 491-507. <https://doi.org/10.1002/ird.2249>.
- Al-Naggar, A.M.M., Abd El-Salam, R.M., Badran, A.E.E., El-Moghazi, M., 2017. Genotype and drought effects on morphological, physiological and yield traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 3, 1-15. <https://doi.org/10.9734/AJAAR/2017/36655>.
- Amiryousefi, M., Tadayan, M.R., Hoseinifard, M., 2019. Effect of nitrogen and phosphorus bio fertilizers on some seed germination traits of two cultivars of quinoa under salinity stress. *Desert*

- Ecosystem Engineering Journal. 8, 79-94. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22052/deej.2018.7.24.49>
- Asadi, R., Hassanpour, F., Mehrabani, M., Baghizadeh, A., Karandish, F., 2019. Effect of regulated deficit and partial root zone drying irrigation on quantitative traits of *Rosmarinus officinalis* L. Journal of Water and Soil. 33, 659-670. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.70053>
- Awa, M., Zhao, J., Tumaerbai, H., 2024. Deficit irrigation-based improvement in growth and yield of quinoa in the northwestern arid region in china. Sustainability, 16, 4136. <https://doi.org/10.3390/su16104136>
- Bagheri, M., 2018. Handbook of Quinoa Cultivation. Seed and Plant Improvement Institute Publication. 48p. [In Persian].
- Bagheri, M., Anafjan, Z., Taherian, M., Emami, A., Molaie, A., Keshavarz, S., 2021. Assessment of adaptability and seed yield stability of selected quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) genotypes in spring cropping system in cold and temperature region of Iran. Iranian Journal of Crop Sciences. 4, 376- 387. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.52547/abj.22.4.376>
- Barideh, R., Besharat, S., Morteza, M., Rezaverdinejad, V., 2018. Effect of partial root zone irrigation on the water use efficiency and root water and nitrate uptake. Water. 10, 526. <https://doi.org/10.3390/w10040526>
- Beltrán, J.A., Saturnin, C., Dao, A., Marta, A.D., Sanou, J., Orlandini S., 2019. Effect of drought and nitrogen fertilisation on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions in Burkina Faso. Italian Journal of Agrometeorology. 1, 33-43. <https://doi.org/10.13128/ijam-289>
- Bogale, A., Tesfaye, K., 2016. Relationship between grain yield and yield components of the Ethiopian durum wheat genotypes at various growth stages. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 19, 81-91.
- Cakir, R., 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research. 89, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Chandra, R., Jain, S.K., Kumar, M., Singh, A.K., Kumar, V., 2018. Comparative effects of deficit irrigation and partial root zone drying (PRD) on growth, yield and water use efficiency of Rabi maize. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 7, 1073-1080. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.133>
- Clarke, J.M., Townley-Smith, F., McCaig, T.N., Green, D.G. 1984. Growth analysis of spring wheat cultivars of varying drought resistance 1. Crop Science, 24, 537-541.
- El-Harty, E. H., Khan, M. A., Seleiman, M. F., Afzal, M., Alghamdi, S. S., 2023. Water use efficiency (WUE) and productivity of promising quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown under three water regimes. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 51, 13209. <https://doi.org/10.15835/nbha51213209>
- Fazeli, F., Akbari, Gh.A., Akbari, GH. A., Naderi Arefi, A., Benakashani, F., 2022. Investigation of the effect of irrigation management on morphological traits, yield and yield components of different genotypes of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Environmental Stresses in Crop Sciences. 15, 327-334. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.3743.1905>
- Forouzandeh, M., Parsa, S., Izanloo, A., Mahmoudi, S., 2024. Morpho-physiological and yield responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) to foliar application of methyl jasmonate and salicylic acid under drought stress. Journal of Agroecology, 15, 683-698. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/agry.2022.73671.1080>
- Hinojosa, L., Matanguihan, J.B., Murphy, K.M., 2019. Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Journal of Agronomy and Crop Science. 205, 33-45. <https://doi.org/10.1111/jac.12302>
- Ghazian Tafrihi, Sh., Ayenehband, A., Tavakoli, H., Khavari Khorasani, S., Joleini, M., 2013. Impacts of drought stress and planting methods on sweet corn yield and water use efficiency. Journal of Plant Physiology and Breeding. 3, 23-31.
- Golestanifar, F., Mahmoodi, S., Fallahi, H.R., Shahidi, A., 2024. Evaluation of physiological growth analysis of some Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties under different moisture levels in spring and summer planting dates at South Khorasan region. Iranian Journal of Field Crops Research. 22, 45-70. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jcsc.2023.82969.1255>

- Hu, T., Kang, S., Li, F., Zhang, J., 2011. Effects of partial root-zone irrigation on hydraulic conductivity in the soil-root system of maize plants. *Journal of Experimental Botany*. 62, 4163-4172. <https://doi.org/10.1093/jxb/err110>
- Jamali, S., Kolahchi, M., 2020. Feasibility study of periodic water stress on quinoa (cv. Titicaca). *Journal of Agroecology*. 10, 137- 148. [In Persian with English Summary].
- Kazemi, M., Alizadeh, A., Sharifan, H., 2019. Investigation of the effect of different irrigation levels on yield and yield components of various quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. National Research Conference on Development and Promotion in Iran. 27 February 2020, Jiroft, Iran. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/1008651>
- Kang, S., Zhang, J., 2004. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 55, 2437-2446. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh249>
- Keshtkar, A., Aien, A., Naghavii, H. Najafi Nezhad, H., 2021. Effect of foliar application of jasmonic acid and drought stress on yield and some agronomic and physiologic traits of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) cultivars. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 14, 403-414. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2402.1711>
- Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F., Shahnazari, A., 2020. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. *Agricultural Water Management*. 234, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094>
- Madadi, E., Fallah, S., 2018. Effect of jasmonic acid and humic acid to mitigate drought stress effect during pollination of forage maize. *Journal of Water and Soil*. 31, 1396- 1408. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/JSW.V31I5.62540>
- Mansouri, A., Omid, H., Bostani, A., 2023. Effect of direct sowing, transplanting, priming and boron foliar application on growth and yield of quinoa genotype. *Journal of Crops Improvement*. 25, 469-484. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.343131.2709>
- Maliro, M.F., Guwela, V.F., Nyaika, J., Murphy, K.M. 2017. Preliminary studies of the performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) genotypes under irrigated and rainfed conditions of central Malawi. *Frontiers in Plant Science*, 8, 227. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00227>
- Martinez, J.P., Silva, H., Ledent, J.F., Pinto, M., 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgarism* L.). *European Journal of Agronomy*, 26, 30-38. <https://doi.org/10.1016/J.eja.2006.08.003>
- Mirsafi, S.M., Sepaskhah, A.R. Ahmadi, S.H., 2024. Physiological traits, crop growth, and grain quality of quinoa in response to deficit irrigation and planting methods. *BMC Plant Biology*. 24, 809. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05523-5>
- Moosavi, S.S., Nazari, M., Chaichi, M., Jamshidi Goharizi, K., 2020. The most effective yield-components associated with increasing yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under terminal drought stress conditions. *Desert*. 25, 139-146. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2020.79251>
- Naderi, N., Fazl Qul, R., Ziatabar Ahmadi, M., Shahnazari, A., Khavari Khorasani, S., 2016. An investigation on physiological and photosynthetic parameters of forage maize at regulated deficit irrigation and partial root zone drying methods. *Journal of Water and Soil*. 30, 432- 442. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i12.48803>
- Nguyen, V.L., Luu, H.N., Phan, T.H.N., Nguyen, V.L., Chu, D.H., Bertero, D., Spillane, C., 2024. Genotype by environment interaction across water regimes in relation to cropping season response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *PLOS ONE*, 19(10), e0309777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309777>
- Papan, P., Mohtaran, A., Ansaryardaly, S., 2023. Investigation of the effect of different amounts of nitrogen fertilizer on yield, yield components and nitrogen use efficiency of two quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) cultivars in southern Khuzestsn province. *Journal of Agroecology*. 14, 671- 691. <https://doi.org/10.22067/AGRY.2021.20327>
- Raeisi Sadat, R., Raeisi Sadat, F., Chamai, E., 2023. Effect of silicon on some morphological traits and yield of summer savory essential oil under drought stress. The Third International Conference and the Seventh National Conference on Organic and Conventional Agriculture. 21 August 2023, Ardabil, Iran. [In Persian].

- Raney, J., Reynolds, D., Elzinga, D., Page, J., Udall, J.A., Jellen, E., Bonfacio, A., Fairbanks, D., Maughan, P. 2014. Transcriptome analysis of drought induced stress in *Chenopodium quinoa*. American Journal of Plant Sciences. 5(3), 338-357. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.53047>
- Razzaghi, F., Bahadori-Ghasroldashti, M.R., Henriksen, S., Sepaskhah, A.R., Jacobsen, S.E., 2020. Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to deficit irrigation imposed at different growing stages-A field study from Southern Iran. Journal of Agronomy and Crop Science. 206, 390-404. <https://doi.org/10.1111/jac.12392>
- Saddiq, M.S., Wang, X., Iqbal, S., Hafeez, M.B., Khan, S., Raza, A., 2021. Effect of water stress on grain yield and physiological characters of quinoa genotypes. Agronomy, 11(1934). <https://doi.org/10.3390/agronomy11101934>
- Sade, N., Gebremedhin, A., Moshelion, M., 2011. Risk-taking plants: Anisohydric behavior as a stress-resistance trait. Plant, Cell and Environment. 35, 569-579. <https://doi.org/10.4161/psb.20505>
- Sajjad, A., Munir, H., Ehsanullah, Anjum, S.A., Tanveer, M., Rehman, A., 2014. Growth and development of *Chenopodium quinoa* genotypes at different sowing dates. Journal of Agricultural Research. 52, 535-546.
- Sahradi, H., Aghayari, F., 2019. Effect of partial root-zone drying irrigation and plant density on yield and water productivity of forage corn. Water and Soil Resources Conservation. 9(1), 123- 138. [In Persian].
- Samadzadeh, A., Zamani, G., Fallahi, H., 2020. Possibility of quinoa production under south-Khorasan climatic condition as affected by planting densities and sowing dates. Applied Field Crops Research. 33, 82-104. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22092/AJ.2020.125793.1392>
- Savic, S., Stikic, R., Jovanovic, Z., Prokic, L., Paukovic, M., 2009. Partial root drying irrigation technique: Practical application of drought stress signaling mechanism in plants. 61, 285-288. Archives of Biological Sciences. <https://doi.org/10.2298/ABS0902285S>
- Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., 2010. A review of partial root- zone drying irrigation. International Journal of Plant Production. 1735-6814. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.708>
- Shadmehri, A., Abbasdokht, H., 2024. Investigating seed priming on some physiological characteristics and yield of three genotypes (Q12, Q29 and Giza1) of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under different irrigation regimes. Environmental Stresses in Crop Sciences, 17, 405-424. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.22077/ESCS.2023.5995.2185>
- Shonga, F.F., 2020. Evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes for growth and yield performance in northern Tanzania. Master's Dissertation, Nelson Mandela African Institution of Science and Technology. Arusha, Tanzania. <https://doi.org/10.58694/20.500.12479/1041>
- Tan, M., Temel, S., 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in different climate conditions. Turkish Journal of Field Crops. 23, 180-186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.485617>
- Voronov, S., Pleskachiov, Y., Shitikova, A., Zargar, M., Abdelkader, M., 2023. Diversity of the biological and proteinogenic characteristics of quinoa genotypes as a multi-purpose crop. Agronomy. 13, 279. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020279>
- Wakrim, R., Wahbi, H., Tahi, H., Aganchich, B., Serraj, R., 2015. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Agriculture, Ecosystems and Environment. 106, 275-287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.01>
- Wan, H., Chen, Y., Cui, B., Liu, X., Hou, J., Wei, Z., Liu, J., Liu, F. 2023. Biochar amendment increases C and N retention in the soil-plant systems: Its implications in enhancing plant growth and water-use efficiency under reduced irrigation regimes of maize (*Zea mays* L.) show affiliations. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 23, 1576-1588. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05523-5>
- Wang, Y., Liu, F., De Neergaard, A.D., Jensen, L.S., Luxhoi, J., Jensen, C.R., 2010. Alternative partial root- zone irrigation induced dry/wet cycles of soils stimulate N mineralization and improve N nutrition in tomatoes. Plant and Soil. 337, 167- 177. <https://doi.org/10.1007/S11104-010-0513-0>