Effect of Irrigation Scheduling at Different Growth Stages and Potassium Levels on Growth and Yield of Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) under the Climatic Conditions of Kashmar, Iran

Introduction

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a promising crop for environments with limited water availability. However, its ability to adapt to environmental stress does not necessarily ensure stable grain production under restricted irrigation. Crop responses may vary depending on the timing and severity of irrigation restrictions, as well as associated management practices. Therefore, irrigation omission should be evaluated in terms of both crop production and irrigation water productivity, rather than water savings alone. The effects of potassium sulfate application may also vary among irrigation regimes. This study evaluated the effects of irrigation omission patterns at different growth stages and potassium sulfate application rates on quinoa growth, biomass production, grain yield, and irrigation water productivity under the climatic conditions of Kashmar, Iran.

Materials and Methods

A field experiment was conducted in 2025 at Kashmar Agricultural Research Station, Razavi Khorasan Province, Iran, using the quinoa cultivar Titicaca. The experiment was arranged as a split-plot design within a randomized complete block design, with three replications, comprising 24 main plots and 72 subplots. The main-plot factor consisted of eight irrigation regimes established by combining two irrigation conditions at each of three growth stages: vegetative growth (V), flowering (F), and grain filling (G). In the treatment codes, 0 indicated that all scheduled irrigation events were maintained at the corresponding stage, whereas 1 indicated the omission of designated irrigation events. Two irrigation events were omitted during vegetative growth and one event during each of the flowering and grain-filling stages. V0F0G0 served as the reference regime, whereas V1F1G1 represented the combined omission treatment across all three stages. The number of omitted irrigation events and the corresponding volumes of water differed among growth stages.

Before the treatments were imposed, two establishment irrigations totaling 300 $m^3\ ha^{-1}$ were applied uniformly to all plots. Total seasonal irrigation, including establishment water, ranged from 2,172.10 to 3,793.43 $m^3\ ha^{-1}$. Irrigation requirements were estimated using reference evapotranspiration calculated by the FAO Penman–Monteith method and published crop coefficients. The subplot factor consisted of three seasonal potassium sulfate application rates: 0, 150, and 300 kg ha^{-1}, designated K0, K1, and K2, respectively. Each seasonal rate was divided into three equal applications, corresponding to 0, 50, or 100 kg ha^{-1} per application. These rates refer to the mass of potassium sulfate fertilizer, not elemental potassium. Sulfur supplied by the fertilizer was not balanced among treatments; consequently, the observed responses were attributed to potassium sulfate application rather than to potassium alone. Fresh biomass yield included grain. The harvested samples used for biomass determination were subsequently air-dried for 7–10 days to determine air-dried biomass yield. Irrigation water productivity was calculated as grain yield divided by total seasonal irrigation water, including establishment water. Data were analyzed according to the split-plot design. Irrigation effects were tested against the main-plot error, whereas potassium sulfate and irrigation × potassium sulfate interaction effects were tested against the subplot error. Mean comparisons were performed at the 5% probability level. The seven degrees of freedom associated with the irrigation factor were partitioned into orthogonal factorial contrasts representing the main effects of V, F, and G and their two-way and three-way interactions. These contrasts were averaged across fertilizer levels and tested against the main-plot error.

Results and Discussion

Irrigation regime and potassium sulfate application significantly affected fresh biomass yield, air-dried biomass yield, grain yield, thousand-grain weight, and irrigation water productivity ($P < 0.01$). The irrigation × potassium sulfate interaction was significant for grain yield at $P < 0.05$ and for the other listed traits at $P < 0.01$. Responses of fresh and air-dried biomass to potassium sulfate application were not always consistent. Under V1F0G0, increasing potassium sulfate application from K0 to K1 significantly increased fresh biomass yield from 11.77 to 13.10 t ha^{-1}. In contrast, air-dried biomass yield changed from 7.50 to

7.44 t ha^{-1}, and this difference was not statistically significant. Thus, a significant increase in fresh biomass was not necessarily accompanied by a significant increase in air-dried biomass. Relative to the reference regime (V0F0G0), V1F1G1 reduced mean fresh biomass yield, air-dried biomass yield, and grain yield by 70.26%, 70.28%, and 77.31%, respectively. Thousand-grain weight decreased by approximately 16.79%, indicating that the reduction in grain yield could not be explained by lower individual grain weight alone. Because grain number was not measured, its contribution to the reduction in grain yield could not be quantified. The highest grain yield (2,829 kg ha^{-1}) was obtained under V0F0G0 × K2, whereas the lowest (398 kg ha^{-1}) was recorded under V1F1G1 × K0. Under V1F1G1, increasing potassium sulfate application from K0 to K2 increased grain yield to 747 kg ha^{-1}. Nevertheless, this increase did not compensate for the yield reduction relative to the reference irrigation regime. Mean irrigation water productivity decreased from approximately 0.649 kg m^{-3} under V0F0G0 to 0.257 kg m^{-3} under V1F1G1. Therefore, reducing irrigation input did not necessarily improve grain production per unit of irrigation water applied. The main effects of V, F, and G were significant for both grain yield and irrigation water productivity. The V × G interaction was significant for grain yield ($P = 0.0284$), while the V × F × G interaction was significant for both grain yield ($P = 0.0011$) and irrigation water productivity ($P = 0.0001$). These findings indicate that the response to irrigation omission at one growth stage depended on the irrigation conditions imposed at the other stages. Nevertheless, the contrasts describe responses to the specific irrigation schedules implemented in this experiment and do not establish an intrinsic ranking of growth-stage sensitivity, because the number of omitted irrigation events and the associated water volumes differed among stages.

Conclusion

Quinoa grain production and irrigation water productivity varied with irrigation omission patterns and potassium sulfate application rates. Combined irrigation omission across all three growth stages substantially reduced grain yield and irrigation water productivity. Potassium sulfate application improved production under some irrigation regimes but did not fully compensate for the effects of severe irrigation restriction. The significant three-way interactions highlight the importance of evaluating complete irrigation schedules rather than considering individual growth stages in isolation. Differences in the number of omitted irrigation events and the associated water volumes also limited comparisons of intrinsic growth-stage sensitivity. Furthermore, the results do not support a uniform recommendation of the highest potassium sulfate application rate across all irrigation regimes. Because the experiment was conducted over one growing season, at one location, and with one cultivar, broader recommendations require further evaluation across multiple years and cultivars, together with an economic assessment.

اثر برنامه‌ریزی آبیاری در مراحل مختلف رشد و سطوح پتاسیم بر رشد و عملکرد کینوا در کاشمر

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی پاسخ کینوا رقم تیتیکاکا به الگوهای حذف آبیاری و مصرف سولفات پتاسیم، در سال ۱۴۰۴ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کاشمر اجرا شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. عامل اصلی شامل هشت الگوی ترکیبی حفظ یا حذف آبیاری در مراحل رویشی، گلدهی و پرشدن دانه بود. در مرحله رویشی دو نوبت و در هر یک از مراحل گلدهی و پرشدن بذر یک نوبت آبیاری حذف شد. عامل فرعی شامل سه سطح صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار طی فصل بود. بهره‌وری آب آبیاری از نسبت عملکرد دانه به مجموع آب آبیاری مصرف‌شده، شامل آب آبیاری مرحله استقرار، محاسبه شد. نتایج نشان داد که اثر رژیم آبیاری و مصرف سولفات پتاسیم بر زیست‌توده تر، ماده خشک، عملکرد دانه، وزن هزار دانه و بهره‌وری آب آبیاری معنی‌دار بود. برهم‌کنش این دو عامل برای عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد و برای سایر صفات مذکور در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. در رژیم حذف آبیاری در هر سه مرحله ($V_1F_1G_1$)، زیست‌توده تر، ماده خشک و عملکرد دانه به‌ترتیب ۷۰/۲۶، ۷۰/۲۸ و ۷۷/۳۱ درصد نسبت به شاهد ($V_0F_0G_0$)کاهش یافتند. همچنین، بهره‌وری آب آبیاری از ۰/۶۴۹ به ۰/۲۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. بیشترین و کمترین عملکرد دانه، به‌ترتیب ۲/۸۲۹ و ۰/۳۹۸ تن در هکتار، در تیمار شاهد آبیاری همراه با بالاترین سطح سولفات پتاسیم و رژیم حذف آبیاری در هر سه مرحله بدون مصرف کود به دست آمد. تحلیل کنتراست‌ها، معنی‌دار بودن برهم‌کنش سه‌گانه مراحل آبیاری را برای عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری نشان

داد. بنابراین، پاسخ گیاه به ترکیب مراحل آبیاری وابسته بود؛ بااین‌حال، به‌دلیل نابرابری شدت حذف آبیاری تعیین قطعی حساس‌ترین مرحله امکان‌پذیر نبود. مصرف سولفات پتاسیم در برخی رژیم‌های آبیاری موجب بهبود تولید شد، اما اثر محدودیت آبیاری را به‌طور کامل جبران نکرد.

واژه‌های کلیدی: *بهره‌وری آب آبیاری، حذف نوبت آبیاری سولفات پتاسیم، عملکرد دانه، مراحل رشد، کینوا.*

Effect of Irrigation Scheduling at Different Growth Stages and Potassium Levels on Growth and Yield of Quinoa in Kashmar, Iran

Abstract

This study was conducted in 2025 at Kashmar Agricultural Research Station, Iran, to investigate the responses of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) cultivar Titicaca to irrigation omission patterns and potassium sulfate application. The experiment was arranged as a split-plot design based on a randomized complete block design with three replications. The main-plot factor consisted of eight irrigation regimes combining the maintenance or omission of irrigation events during the vegetative, flowering, and grain-filling stages. Two irrigation events were omitted during the vegetative stage and one event during each of the flowering and grain-filling stages. The subplot factor comprised three seasonal potassium sulfate application rates of 0, 150, and 300 kg ha^{-1}. Irrigation water productivity was calculated as the ratio of grain yield to total irrigation water applied, including establishment irrigation. The results showed that irrigation regime and potassium sulfate application significantly affected fresh biomass yield, dry matter yield, grain yield, thousand-grain weight, and irrigation water productivity. The interaction between these factors was significant for grain yield at the 5% probability level and for the other mentioned traits at the 1% probability level. Under the irrigation regime involving omission at all three growth stages ($V_1F_1G_1$), fresh biomass yield, dry matter yield, and grain yield decreased by 70.26%, 70.28%, and 77.31%, respectively, compared with the reference irrigation regime ($V_0F_0G_0$). Mean irrigation water productivity also decreased from 0.649 to 0.257 kg m^{-3}. The highest and lowest grain yields, 2.829 and 0.398 t ha^{-1}, respectively, were obtained under the combination of the reference irrigation regime with the highest potassium sulfate rate and the combined omission regime without fertilizer application. Contrast analysis revealed a significant three-way interaction among the irrigation components for grain yield and irrigation water productivity. These findings indicate that crop responses depended on the combination of irrigation conditions across growth stages. However, due to differences in the intensity of irrigation omission, definitive identification of the most sensitive growth stage was not possible. Potassium sulfate application improved crop production under some irrigation regimes but did not fully compensate for the adverse effects of irrigation restriction.

Keywords: irrigation omission,, irrigation water productivity, grain yield, growth stages, potassium sulfate, quinoa,

مقدمه

مدیریت آب آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک مستلزم توجه هم‌زمان به حفظ تولید و بهره‌وری منابع آب است. کاهش آب آبیاری زمانی می‌تواند راهبردی مدیریتی و قابل دفاع باشد که پیامدهای آن برای عملکرد محصول و بهره‌وری آب نیز ارزیابی شده باشد. ازاین‌رو، بررسی برنامه‌های کم‌آبیاری نباید صرفاً به مقایسه حجم آب مصرف‌شده محدود شود، بلکه لازم است پاسخ رشد و تولید گیاه به مقدار و توزیع زمانی آب نیز در نظر گرفته شود. کینوا[1] به‌دلیل ارزش غذایی و قابلیت سازگاری با محیط‌های متنوع، از جمله گزینه‌های مورد توجه برای تنوع‌بخشی به تولید کشاورزی در شرایط محدودیت منابع است. بااین‌حال، سازگاری نسبی این گیاه با خشکی و شوری به معنای حفظ عملکرد در همه شرایط نامساعد نیست؛ زیرا پاسخ آن به ویژگی‌های ژنتیکی، شدت و مدت محدودیت آب و مدیریت زراعی وابسته است (Pathan et al. 2023). یکی از مسائل مهم در مدیریت آبیاری کینوا، تفاوت پاسخ گیاه به محدودیت آب در مراحل مختلف رشد است. محدودیت آب در مرحله رویشی می‌تواند رشد اندام‌های هوایی و ظرفیت تولید ماده خشک را تحت تأثیر قرار دهد، درحالی‌که وقوع آن در مراحل گلدهی و پرشدن دانه ممکن است تشکیل و رشد دانه را محدود کند. Razzaghi et al. (2020) در آزمایشی دوساله روی رقم تیتیکاکا در جنوب ایران، تیمارهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری معادل ۵۰ درصد آبیاری کامل را در مراحل مختلف رشد بررسی کردند. در این مطالعه، کم‌آبیاری با کاهش ارتفاع بوته، هدایت روزنه‌ای و عملکرد دانه همراه بود و گلدهی به‌عنوان مرحله‌ای حساس گزارش شد. همچنین، تأمین آب در مرحله پرشدن دانه نتوانست کاهش عملکرد ناشی از محدودیت آب در مراحل پیشین را جبران کند. بهادری و همکاران (۱۴۰۱) نیز در بررسی کم‌آبیاری معادل ۵۰ درصد آبیاری کامل در مراحل رویشی، گلدهی و پرشدن دانه رقم تیتیکاکا، کاهش هدایت روزنه‌ای، شاخص سطح برگ، پتانسیل

[1] *Chenopodium quinoa* Willd.

آب برگ، عملکرد دانه و بهره‌وری آب و افزایش دمای پوشش گیاهی را گزارش کردند. در آن پژوهش، اعمال محدودیت آب در مرحله گلدهی، در مقایسه با مراحل رویشی و پرشدن دانه، با عملکرد کمتری همراه بود. بااین‌حال، تفسیر تفاوت پاسخ مراحل رشد مستلزم توجه به شدت، مدت و روش اعمال محدودیت آب است؛ زیرا تأمین درصد مشخصی از نیاز آبی در طول یک مرحله، با حذف نوبت‌های معین آبیاری یکسان نیست. علاوه بر زمان اعمال محدودیت، مقدار آب تأمین‌شده و روش کاشت نیز می‌توانند دامنه پاسخ کینوا را تغییر دهند. Mirsafi et al. (2024) گزارش کردند که تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی، بسته به روش کاشت، ماده خشک کل را ۳ تا ۱۷ درصد و تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی، آن را ۱۱ تا ۳۰ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش داد. در همان پژوهش، ارتفاع بوته در این دو سطح کم‌آبیاری به‌ترتیب ۶/۱ و ۱۶/۷ درصد و تعداد پانیکول‌ها ۱۸/۴ و ۳۶/۵ درصد کمتر از آبیاری کامل بود. تفاوت پاسخ این صفات نشان می‌دهد که ارزیابی برنامه‌های آبیاری باید رشد رویشی، ساختار زایشی و تولید نهایی را به‌صورت هم‌زمان در بر گیرد. همچنین، برای سنجش سودمندی کاهش آب آبیاری، لازم است مقدار تولید به‌ازای آب مصرف‌شده نیز بررسی شود؛ زیرا کاهش حجم آب، بدون توجه به میزان افت عملکرد، به‌تنهایی بیانگر بهبود مدیریت آبیاری نیست. در کنار مدیریت آب، وضعیت تغذیه‌ای گیاه نیز در تعیین رشد و تولید اهمیت دارد. پتاسیم در تنظیم روابط آبی، فعالیت روزنه‌ها، فعال‌سازی آنزیم‌ها و انتقال مواد فتوسنتزی نقش دارد؛ بااین‌حال، پاسخ به مصرف آن به وضعیت حاصلخیزی خاک، مقدار پتاسیم قابل جذب و شرایط محیطی وابسته است. Turcios et al. (2021) نشان دادند که تأمین مناسب پتاسیم در شرایط شوری متوسط می‌تواند رشد و تولید زیست‌توده کینوا را بهبود دهد و بر بهره‌وری آب مبتنی بر زیست‌توده اثر بگذارد. این مطالعه شواهدی درباره اهمیت تغذیه پتاسیمی در شرایط نامساعد فراهم می‌کند، اما تفاوت نوع تنش و مبنای محاسبه بهره‌وری آب، تعمیم مستقیم نتایج آن به خشکی و بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد دانه را محدود می‌سازد. پاسخ تولیدی کینوا به پتاسیم در مطالعه مزرعه‌ای دوساله Taaime et al. (2023) در شرایط نیمه‌خشک مراکش نیز بررسی شد. آنان چهار سطح نیتروژن، سه سطح فسفر و سه سطح پتاسیم، شامل صفر، ۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم K_2O در هکتار، را ارزیابی کردند. مصرف ۱۲۰ کیلوگرم K_2O در هکتار، عملکرد دانه را در هر دو فصل حدود ۲۵ درصد نسبت به تیمار بدون پتاسیم افزایش داد. همچنین، ترکیب ۴۰ کیلوگرم نیتروژن، ۶۰ کیلوگرم P_2O_5 و ۱۲۰ کیلوگرم K_2O در هکتار، عملکرد زیست‌توده و دانه را به‌ترتیب به حدود ۳/۹ و ۰/۸ تن در هکتار رساند. این نتایج ظرفیت پاسخ کینوا به تغذیه را نشان می‌دهند؛ هرچند پاسخ حاصل از مصرف ترکیبی عناصر را نمی‌توان صرفاً به اثر پتاسیم نسبت داد. بررسی هم‌زمان آب و تغذیه از آن جهت اهمیت دارد که پاسخ به کود و سطح مناسب مصرف آن ممکن است با تغییر دسترسی گیاه به آب متفاوت باشد. Li et al. (2025) در آزمایشی با سه سطح آبیاری ۲۱۰۰، ۲۷۰۰ و ۳۳۰۰ مترمکعب در هکتار و پنج سطح نیتروژن، ترکیب ۲۷۰۰ مترمکعب آب و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار را برای شرایط مطالعه خود پیشنهاد کردند. این پژوهش ضرورت ارزیابی توأمان عملکرد، کیفیت محصول و بهره‌وری منابع را نشان می‌دهد. بااین‌حال، شواهد مربوط به آب و نیتروژن، پاسخ کینوا به مصرف سولفات پتاسیم در الگوهای مرحله‌ای حذف آبیاری را مشخص نمی‌کنند و بررسی مستقیم این ترکیب مدیریتی همچنان ضرورت دارد. در مجموع، پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که پاسخ کینوا به محدودیت آب باید با توجه به مرحله رشد، شدت محدودیت و شیوه اعمال آن تفسیر شود. مطالعات تغذیه‌ای نیز بیانگر ظرفیت پاسخ این گیاه به کود هستند، اما تفاوت نوع تنش، ترکیب عناصر غذایی و شاخص‌های ارزیابی، مقایسه و تعمیم نتایج را محدود می‌کند. بنابراین، برای ارزیابی کاربرد سولفات پتاسیم در برنامه‌های مشخص حذف آبیاری، به بررسی هم‌زمان رشد، تولید زیست‌توده، عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری

در یک چارچوب آزمایشی مشترک نیاز است. چنین ارزیابی‌ای در شرایط کاشمر می‌تواند به روشن‌شدن موازنه میان کاهش آب آبیاری و حفظ تولید کمک کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر هشت الگوی حفظ یا حذف آبیاری در مراحل رویشی، گلدهی و پرشدن دانه و سه سطح مصرف فصلی سولفات پتاسیم شامل صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بر رشد، تولید زیست‌توده و ماده خشک، عملکرد و اجزای عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری کینوا در شرایط کاشمر انجام شد. در برنامه اجرایی، دو نوبت آبیاری در مرحله رویشی و یک نوبت در هر یک از مراحل گلدهی و پرشدن دانه حذف شد؛ ازاین‌رو، مقایسه‌ها ناظر بر پاسخ گیاه به این الگوهای اجرایی بود، نه تعیین حساسیت ذاتی مراحل رشد در شرایط شدت یکسان کمبود آب. برای تفکیک مؤلفه‌های مرحله‌ای رژیم آبیاری نیز اثرهای اصلی و برهم‌کنش مراحل با استفاده از تحلیل کنتراستی بررسی شدند. فرضیه پژوهش این بود که پاسخ رشد و تولید کینوا به الگوی حذف آبیاری در مراحل مختلف رشد وابسته است و اثر مصرف سولفات پتاسیم بر صفات مورد بررسی نیز تحت تأثیر رژیم آبیاری قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش و طرح آزمایشی

آزمایش مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۴ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کاشمر، واقع در استان خراسان رضوی، اجرا شد. این ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی و در ارتفاع ۱۱۰۹ متر از سطح دریا قرار دارد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این طرح، ابتدا هشت الگوی آبیاری به‌طور تصادفی به کرت‌های اصلی هر بلوک اختصاص یافتند؛ سپس سه سطح سولفات پتاسیم نیز به‌طور تصادفی در زیرکرت‌های هر کرت اصلی قرار گرفتند. هر تکرار شامل هشت کرت اصلی بود که هر یک به سه زیرکرت تقسیم شدند. بنابراین، آزمایش در مجموع شامل ۲۴ کرت اصلی و ۷۲ زیرکرت بود.

تیمارهای آبیاری

تیمارهای آبیاری بر اساس سه مرحله اصلی رشد کینوا شامل مرحله رویشی(V) ، مرحله گلدهی (F) و مرحله پر شدن دانه (G) اعمال شدند. در کدگذاری تیمارهای آبیاری، عدد صفر (۰) نشان‌دهنده انجام تمام نوبت‌های آبیاری برنامه‌ریزی‌شده در مرحله مربوط و عدد یک (۱) نشان‌دهنده اعمال محدودیت آبی از طریق کاهش تعداد نوبت‌های آبیاری در مرحله رشد مربوط بود. بر این اساس، هشت الگوی آبیاری از ترکیب وضعیت‌های مختلف آبیاری در سه مرحله رشد تشکیل شدند (جدول ۱).

جدول ۱. الگوهای مختلف آبیاری در مراحل رشد کینوا

تعداد نوبت های آبیاری در دوره اعمال تیمار	مرحله پر شدن دانه(G)	مرحله گلدهی(F)	مرحله رویشی(V)	کد تیمار
۹ نوبت	آبیاری معمول (۲ نوبت)	آبیاری معمول (۳ نوبت)	آبیاری معمول (۴ نوبت)	$V_0F_0G_0$
۸ نوبت	آبیاری معمول (۲ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	آبیاری معمول (۴ نوبت)	$V_0F_1G_0$
۸ نوبت	محدودیت آبی (۱ نوبت)	آبیاری معمول (۳ نوبت)	آبیاری معمول (۴ نوبت)	$V_0F_0G_1$
۷ نوبت	محدودیت آبی(۱ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	آبیاری معمول (۴ نوبت)	$V_0F_1G_1$
۷ نوبت	آبیاری معمول (۲ نوبت)	آبیاری معمول(۳ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	$V_1F_0G_0$
۶ نوبت	آبیاری معمول(۲ نوبت)	محدودیت آبی(۲ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	$V_1F_1G_0$
۶ نوبت	محدودیت آبی (۱ نوبت)	آبیاری معمول (۳ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	$V_1F_0G_1$
۵ نوبت	محدودیت آبی (۱ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	محدودیت آبی (۲ نوبت)	$V_1F_1G_1$

اعداد، تعداد نوبت‌های انجام‌شده در هر دوره هستند. دو آبیاری استقرار در شمارش این جدول منظور نشده‌اند، اما حجم آن‌ها در مجموع آب آبیاری فصل لحاظ شده است.

برنامه آبیاری شاهد در دوره اعمال تیمارها شامل ۹ نوبت بود که چهار نوبت در مرحله رویشی، سه نوبت در مرحله گلدهی و دو نوبت در مرحله پر شدن دانه انجام شد. در تیمارهای دارای کد V_1، نوبت‌های دوم و چهارم مرحله رویشی حذف شدند؛ بنابراین، این تیمارها در مرحله رویشی دو نوبت آبیاری دریافت کردند. در تیمارهای دارای کد F_1، نوبت دوم مرحله گلدهی حذف شد و دو نوبت آبیاری انجام گرفت. در تیمارهای دارای کد G_1، نوبت اول مرحله پر شدن دانه حذف شد و فقط نوبت دوم انجام گرفت. بنابراین، تعداد آبیاری‌های دوره اعمال تیمارها از پنج تا نه نوبت متغیر بود. فاصله زمانی آبیاری‌ها در تمام دوره‌ها یکسان نبود؛ ازاین‌رو، رژیم‌ها بر اساس تقویم واقعی نوبت‌های انجام‌شده و حذف‌شده تعریف شدند، نه یک دور ثابت برای کل فصل. تاریخ‌ها و حجم آب هر نوبت، مجموع آب هر مرحله و مجموع آب فصل در جدول ۵ آب آبیاری ارائه شده‌اند.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و تیمارهای سولفات پتاسیم

پیش از کشت، از عمق‌های صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق	بافت خاک	اسیدیته	هدایت الکتریکی	شن	سیلت	رس	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	آهن	منگنز	روی	مس	رطوبت اشباع	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دائم	چگالی ظاهری خاک
cm		pH	dS/m	%	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	g/cm³
۳۰–۰	سیلت لوم	۸/۱	۱/۸۱	۱۹	۶۰	۲۱	۹	۱۷۵	۴/۳	۱۱/۳۶	۲/۶۴	۱/۷	۰/۳۵	۰/۱۳۷۳	۰/۰۷۶۹	۱/۴
۶۰–۳۰	سیلت لوم	۸/۳	۱/۰۴	۱۹	۶۰	۲۱	۵/۳	۱۵۴	۳	۶/۶۴	۱/۱	۱/۱۲	۰/۳۵	۰/۱۵۵۵	۰/۰۷۵۳	۱/۴

تیمارهای کودی شامل صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار طی فصل، با کدهای K_0 ، K_1 و K_2 بودند. مقدار فصلی هر تیمار در سه نوبت مساوی مصرف شد. تاریخ و مقدار هر نوبت در جدول ۳ آمده است. کود در آب حل و همراه آب آبیاری به زیرکرت مربوط اعمال شد. هر سه نوبت کوددهی در تاریخ‌های مشترک آبیاری همه رژیم‌ها انجام گرفت؛ بنابراین، حذف آبیاری موجب تغییر مقدار یا تعداد دفعات مصرف کود نشد.

جدول ۳. سطوح کود سولفات پتاسیم و مقدار مصرف در مراحل رشد

کد تیمار	مرحله رویشی(kg/ha)	گل‌دهی(kg/ha)	پرشدن دانه(kg/ha)	مجموع مصرف فصلی(kg/ha)
K۰	۰	۰	۰	۰
K۱	۵۰	۵۰	۵۰	۱۵۰
K۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۳۰۰
تاریخ اعمال کود	۱۵ شهریور	۱۳ مهر	۲۷ مهر	–

مقادیر جدول بر حسب کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار هستند، نه پتاسیم خالص.

کود گوگردی جداگانه مصرف نشد؛ بااین‌حال، گوگرد همراه سولفات پتاسیم میان تیمارها متعادل نشد. بنابراین، پاسخ مشاهده‌شده به مصرف سولفات پتاسیم نسبت داده شد و سهم مستقل پتاسیم و گوگرد قابل تفکیک نبود.

مشخصات کشت و مراحل فنولوژیک

کینوا رقم تیتیکاکا (Titicaca) در تاریخ ۱ مرداد ۱۴۰۴ به‌صورت دستی و در عمق یک تا دو سانتی‌متری کشت شد. سبز شدن گیاه حدود شش روز پس از کاشت مشاهده شد. پیش از آغاز اعمال تیمارهای آبیاری، دو نوبت آبیاری با مجموع عمق ۳۰ میلی‌متر برای جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها انجام گرفت. پس از استقرار، عملیات تنک و وجین انجام شد و تراکم نهایی به ۱۵ بوته در مترمربع، معادل ۶۰ بوته در هر زیرکرت چهار مترمربعی، رسید. هر کرت اصلی دارای ابعاد ۲ × ۸ متر و مساحت ناخالص ۱۶ مترمربع بود و سه زیرکرت با ابعاد ۲ × ۲ متر را دربر می‌گرفت. دو فاصله یک‌متری بین زیرکرت‌های مجاور در نظر گرفته شد؛ بنابراین، مجموع مساحت خالص زیرکرت‌ها در هر کرت اصلی ۱۲ مترمربع بود. در هر زیرکرت، چهار پشته با فاصله ۰/۵ متر ایجاد شد. تیمارهای سولفات پتاسیم در زیرکرت‌ها اعمال شدند. مراحل رشد بر اساس مشاهدات مستقیم مزرعه‌ای تعیین شدند. برداشت محصول در تاریخ ۱۵ آبان ۱۴۰۴ انجام گرفت. (جدول ۴). طول دوره‌ها با احتساب روز آغاز و پایان محاسبه شده است. جدول، بازه‌های اجرایی اعمال تیمار را نشان می‌دهد و بیانگر ثبت جداگانه فنولوژی هر ترکیب تیماری نیست.

جدول ۴. زمان‌بندی کشت، استقرار، دوره‌های اعمال تیمار آبیاری و برداشت کینوا

طول دوره (روز)	تاریخ پایان	تاریخ آغاز	مرحله رشد
۳۱	۳۱ مرداد	۱ مرداد	کشت و استقرار و رشد اولیه پیش از اعمال تیمارها
۲۲	۲۲ شهریور	۱شهریور	دوره اعمال تیمار رویشی(V)
۲۲	۱۳ مهر	۲۳ شهریور	دوره اعمال تیمار گلدهی(F)
۳۲	۱۵ آبان	۱۴ مهر	دوره اعمال تیمار پر شدن دانه(G)
-	-	۱۵ آبان	برداشت محصول

محاسبه تبخیر–تعرق مرجع و نیاز آبی

به‌منظور تدوین برنامه پایه آبیاری کینوا، تبخیر–تعرق مرجع (ET_0) با استفاده از داده‌های بلندمدت هواشناسی ایستگاه سینوپتیک کاشمر در دوره آماری ۱۳۷۰–۱۴۰۰ و معادله استاندارد فائو–پنمن–مانتیث محاسبه شد (Allen et al., 1998). متغیرهای هواشناسی مورد استفاده شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی بودند. بنابراین، مقادیر برآوردشده ET_0 و تبخیر–تعرق گیاه، مبنای اقلیمی تدوین برنامه آبیاری بودند و برآورد مبتنی بر مشاهدات هواشناسی فصل اجرای آزمایش محسوب نمی‌شوند. معادله فائو–پنمن–مانتیث به‌صورت زیر است:

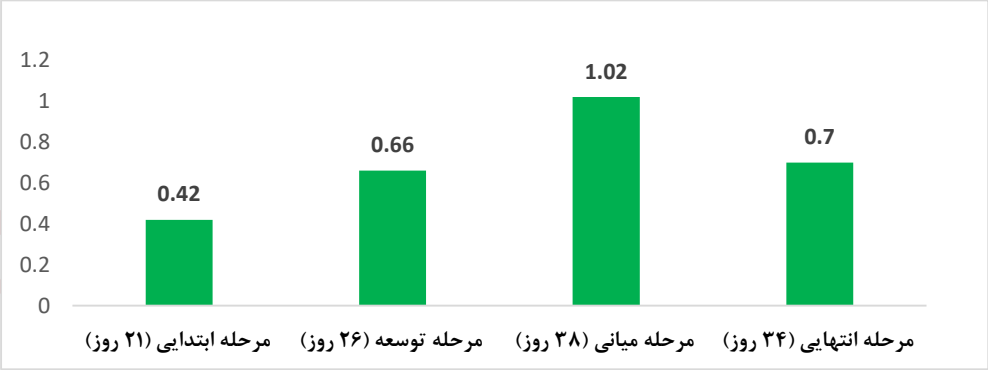
رابطهٔ ۱)
$$ET_0 = \frac{0.0408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

که در آن، ET_0 تبخیر–تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، R_n تابش خالص (مگاژول بر مترمربع در روز)، G شار گرمایی خاک، T میانگین دمای روزانه هوا (درجه سلسیوس)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع، e_a فشار بخار واقعی، Δ شیب منحنی فشار بخار و γ ثابت سایکرومتری است. پس از تعیین ET_0، تبخیر–تعرق گیاه با استفاده از ضریب گیاهی مربوط به مرحله رشد از رابطه زیر محاسبه شد (رابطه ۲):

رابطهٔ ۲)
$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

در این رابطه، ET_c تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر در روز) و K_c ضریب گیاهی بدون بُعد است.

ضرایب گیاهی مورد استفاده برای مراحل مختلف رشد کینوا از مطالعه گلستانی‌فر و همکاران (۱۴۰۱) استخراج شد. (شکل ۱).



شکل ۱. مقادیر ضریب گیاهی (K_c) کینوا در مراحل مختلف رشد

مرحله‌بندی مورد استفاده برای تخصیص ضرایب گیاهی، از سه دوره اعمال تیمار آبیاری متمایز بود. مقادیر روزانه تبخیر–تعرق مرجع و تبخیر–تعرق گیاه محاسبه شدند. عمق آب هر نوبت از مجموع مقادیر روزانه ET_c در بازه محاسباتی متناظر با همان نوبت در برنامه پایه آبیاری به دست آمد. در تیمارهای دارای حذف آبیاری، آب مربوط به نوبت حذف‌شده اعمال نشد و به حجم نوبت بعدی نیز اضافه نگردید.

بررسی شرایط هواشناسی و تبخیرــتعرق در سال اجرای آزمایش

علاوه بر استفاده از داده‌های بلندمدت برای تنظیم برنامه پایه آبیاری، به‌منظور توصیف شرایط جوی در سال اجرای آزمایش، داده‌های روزانه هواشناسی سال ۱۴۰۴ نیز بررسی شد. متغیرهای هواشناسی شامل میانگین دمای هوا، میانگین دمای بیشینه و کمینه، مجموع بارندگی، میانگین رطوبت نسبی، مجموع تابش خورشیدی و میانگین سرعت باد بودند. داده‌ها بر اساس بازه‌های زمانی منتهی به تاریخ‌های آبیاری دسته‌بندی شدند؛ به‌طوری‌که میانگین متغیرهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد و مجموع بارندگی و تابش خورشیدی برای هر بازه محاسبه شد. تبخیرــتعرق مرجع سال اجرای آزمایش نیز با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه و بر اساس معادله فائو–پنمن–مانتیث محاسبه شد. سپس مقادیر روزانه ET_0 در هر بازه زمانی با یکدیگر جمع شدند تا تبخیرــتعرق مرجع تجمعی هر دوره به دست آید. به همین ترتیب، مقادیر متناظر تبخیرــتعرق مرجع بلندمدت نیز برای همان بازه‌ها محاسبه و تجمیع شد. اطلاعات هواشناسی و مقادیر تجمعی ET_0 سال اجرای آزمایش و دوره بلندمدت در جدول در نتایج ارائه شده‌اند.

اندازه‌گیری و اعمال حجم آب در تیمارهای آبیاری

آبیاری به روش سطحی و با سامانه جوی و پشته انجام شد. در هر کرت اصلی پنج جوی و چهار پشته وجود داشت. آب از طریق لوله به ابتدای جوی‌ها منتقل و جریان آن با شیرهای پروانه‌ای کنترل شد. در ابتدای هر بلوک یک کنتور حجمی نصب شد و آبیاری کرت‌های اصلی به‌صورت متوالی انجام گرفت. پیش از شروع آبیاری هر کرت اصلی، قرائت اولیه کنتور ثبت شد. سپس شیرهای مربوط به آن کرت باز شدند و پس از اعمال حجم موردنظر، شیرها بسته و قرائت نهایی ثبت شد. اختلاف دو قرائت، حجم آب اعمال‌شده به همان کرت اصلی در نوبت مربوط را نشان می‌داد. این فرایند برای تمام کرت‌های اصلی هر سه بلوک تکرار شد. سه زیرکرت هر کرت اصلی تحت برنامه آبیاری مشترک قرار داشتند. حجم آب موردنیاز هر نوبت، با استفاده از عمق تعیین‌شده برای همان نوبت در برنامه پایه آبیاری و مساحت ناخالص کرت اصلی، محاسبه شد: (رابطه ۳)

رابطهٔ ۳)

$$V = \frac{I \times A}{1000}$$

که در آن، (V)حجم آب آبیاری (مترمکعب)، (I)عمق آب آبیاری (میلی‌متر) و (A) مساحت کرت اصلی (مترمربع) است. مساحت مبنای محاسبه و اعمال آب ۱۶ مترمربع بود؛ بنابراین، هر میلی‌متر عمق آب معادل ۱۶ لیتر برای هر کرت اصلی بود. مجموع آب آبیاری هر تیمار از جمع حجم نوبت‌های انجام‌شده و آب آبیاری استقرار محاسبه شد. مقادیر ثبت‌شده بر اساس مساحت کرت اصلی به عمق معادل آب آبیاری و حجم آب در واحد سطح تبدیل شدند.

صفات اندازه‌گیری‌شده

صفات مورد بررسی شامل عملکرد زیست‌توده تر، عملکرد ماده خشک، تعداد بوته، ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول بخش گل‌آذین‌دار بوته، تعداد گل‌آذین، تعداد شاخه جانبی، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب آبیاری بودند. برای تعیین عملکرد، سطح مرکزی هر زیرکرت شامل پشته‌های دوم و سوم، به ابعاد ۲ × ۱ متر و مساحت دو مترمربع، برداشت شد. تعداد بوته‌های برداشت‌شده از همین سطح شمارش و بر حسب بوته در دو مترمربع ثبت شد. نمونه برداشت‌شده ابتدا توزین و وزن آن به‌عنوان زیست‌توده تر ثبت شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۷ تا ۱۰ روز در هوای آزاد، تا رسیدن به وزن ثابت، خشک و دوباره توزین شدند. وزن حاصل با عنوان ماده خشک گزارش شد. عملکرد زیست‌توده تر، ماده خشک و دانه بر اساس سطح برداشت به تن در هکتار تبدیل شدند. برای اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک، سه بوته به‌طور تصادفی از هر زیرکرت انتخاب شدند. ارتفاع بوته از سطح خاک تا انتهای بوته با خط‌کش اندازه‌گیری شد. برای صفت ثبت‌شده با عنوان طول بخش گل‌آذین‌دار، فاصله محل ظهور نخستین شاخه فرعی تا انتهای بوته اندازه‌گیری و بر حسب سانتی‌متر ثبت شد. قطر ساقه اصلی در بخش پایینی ساقه، نزدیک سطح خاک، با کولیس اندازه‌گیری و بر حسب میلی‌متر گزارش شد. تعداد گل‌آذین و شاخه جانبی شمارش و میانگین آن‌ها بر حسب تعداد در بوته محاسبه شد. عملکرد

دانه پس از خرمن‌کوبی و جداسازی دانه‌های نمونه برداشت‌شده تعیین شد. وزن هزار دانه با شمارش هزار دانه سالم و توزین با ترازوی دارای دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. شاخص برداشت از نسبت عملکرد دانه به عملکرد ماده خشک کل اندام هوایی (شامل دانه) محاسبه و بر حسب درصد گزارش شد. (رابطه ۴):

$$HI = \frac{GY}{BY_{dry}} * 100$$ رابطهٔ ۴)

که در آن، HIشاخص برداشت (درصد)، GYعملکرد دانه (تن در هکتار) و BY_{dry} عملکرد ماده خشک اندام هوایی(تن در هکتار) است. بهره‌وری آب آبیاری برای همه‌ی تیمارها با یک روش واحد و بر اساس عملکرد دانه‌ی خشک تقسیم بر مجموع آب آبیاری اعمال‌شده، شامل آب استقرار و آب دوره‌ی اعمال تیمارها، محاسبه شد. (رابطه ۵):

$$WP_g = \frac{GY}{(I_{Total}) * 10}$$ رابطهٔ ۵)

که در آن، (WP_g)بهره‌وری آب بر اساس عملکرد دانه (کیلوگرم بر مترمکعب)، (GY)عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و (I_{Total}) عمق کل آب آبیاری اعمال شده با احتساب آب دوره استقرار (میلی‌متر) است. ضریب ۱۰ برای تبدیل واحد عملکرد و عمق آب به کیلوگرم بر مترمکعب در رابطه لحاظ شده است. بنابراین، شاخص محاسبه‌شده در این پژوهش بیانگر عملکرد دانه به ازای حجم آب آبیاری اعمال‌شده است و نباید با بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر–تعرق واقعی گیاه اشتباه گرفته شود.

تجزیه آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴، بر اساس طرح کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه شدند. رژیم آبیاری عامل اصلی، سولفات پتاسیم عامل فرعی و تکرار عامل بلوکی بود. اثر رژیم آبیاری با استفاده از خطای کرت اصلی، متناظر با برهم‌کنش تکرار × آبیاری، و اثر سولفات پتاسیم و برهم‌کنش آبیاری × سولفات پتاسیم با استفاده از خطای کرت فرعی آزمون شدند. مقایسه میانگین‌های اثر اصلی آبیاری با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار فیشر در سطح احتمال پنج درصد و با استفاده از خطای کرت اصلی انجام شد. برای مقایسه میانگین‌های اثر اصلی سولفات پتاسیم، خطای کرت فرعی به کار رفت. اختلاف میانگین‌های تعدیل‌شده ترکیب‌های آبیاری × سولفات پتاسیم با دستور LSMEANS و گزینه PDIFF بررسی شد. برای بررسی مؤلفه‌های مرحله‌ای رژیم آبیاری، هفت درجه آزادی این عامل به هفت کنتراست فاکتوریل متعامد، هر یک با یک درجه آزادی، تفکیک شد. این کنتراست‌ها شامل V ، F، G، V × F، V × G، F × Gو V × F × G بودند. در هر دوره، سطح صفر بیانگر انجام تمام نوبت‌های برنامه‌ریزی‌شده و سطح یک بیانگر حذف نوبت‌های تعیین‌شده بود. کنتراست‌ها با میانگین‌گیری در سطوح سولفات پتاسیم و با استفاده از خطای کرت اصلی آزمون شدند. تحلیل برای عملکرد دانه، بهره‌وری آب آبیاری و شاخص برداشت انجام گرفت.

نتایج و بحث

حجم آب آبیاری اعمال‌شده و میزان کاهش آن در الگوهای مختلف آبیاری

به‌منظور بررسی شرایط هواشناسی حاکم بر دوره اجرای آزمایش و توصیف وضعیت تبخیری منطقه در زمان اعمال تیمارهای آبیاری، داده‌های هواشناسی سال ۱۴۰۴ و مقادیر تبخیر–تعرق مرجع بلندمدت بررسی شدند. داده‌های هواشناسی سال آزمایش از پایگاه NASA POWER استخراج و بر اساس بازه‌های زمانی منتهی به تاریخ‌های آبیاری تجمیع شدند. در این بازه‌ها، میانگین دما، دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی و سرعت باد و همچنین مجموع بارندگی و تابش خورشیدی محاسبه شد. برای مقایسه شرایط تبخیری سال اجرای آزمایش با وضعیت اقلیمی بلندمدت منطقه، مجموع تبخیر–تعرق مرجع هر بازه نیز در کنار مقادیر بلندمدت متناظر ارائه شده است. خلاصه اطلاعات هواشناسی و مقادیر تجمعی تبخیر–تعرق مرجع در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. داده‌های هواشناسی و تبخیر و تعرق مرجع در تاریخ‌های آبیاری آزمایش

تاریخ آبیاری	بازه محاسبه	تعداد روز	میانگی ن دما (°C)	میانگین دمای بیشینه (°C)	میانگین دمای کمینه (°C)	مجموع بارندگی (mm)	میانگین رطوبت نسبی (٪)	مجموع تابش خورشیدی (Mj m²)	میانگین سرعت باد (ms⁻¹)	مجموع ETo سال آزمایش (mm)	مجموع ETo بلندمدت (mm)
۱ شهریور ۱۴۰۴	۲۵ تا ۳۱ مرداد	۷	۲۱/۶۴	۳۱/۱۴	۱۲/۹۳	۰	۲۳/۸۷	۱۸۰/۵۰	۴/۳۴	۵۹/۹۶	۵۹/۹۰
۸ شهریور ۱۴۰۴	۲ تا ۸ شهریور	۷	۲۰/۸۳	۳۰/۱۸	۱۲/۵۲	۰	۲۰/۸۷	۱۸۱/۹۴	۵/۴۴	۶۵/۱۵	۵۸/۰۷
۱۵ شهریور ۱۴۰۴	۹ تا ۱۵ شهریور	۷	۱۹/۶۶	۲۹/۱۵	۱۰/۹۱	۰	۱۹/۱۵	۱۷۱/۳۴	۳/۹۳	۵۴/۴۰	۵۴/۹۱
۲۲ شهریور ۱۴۰۴	۱۶ تا ۲۲ شهریور	۷	۲۲/۳۷	۳۱/۶۷	۱۳/۵۷	۰	۲۲/۱۴	۱۵۸/۴۷	۲/۷۵	۴۷/۲۲	۵۰/۸۴
۲۹ شهریور ۱۴۰۴	۲۳ تا ۲۹ شهریور	۷	۱۸/۰۲	۲۷/۴۴	۹/۶۳	۰	۳۶/۷۹	۱۴۶/۴۹	۳/۱۰	۳۹	۴۷/۹۲
۶ مهر ۱۴۰۴	۳۰ شهریور تا ۶ مهر	۸	۱۵/۲۰	۲۴/۳۳	۷/۶۵	۰	۳۸/۳۵	۱۵۱/۷۷	۳/۹۲	۴۲/۲۵	۴۸/۰۵
۱۳ مهر ۱۴۰۴	۷ تا ۱۳ مهر	۷	۱۴/۹۸	۲۴/۴۸	۷/۴۷	۰	۲۷/۵۳	۱۳۶/۲۳	۳/۱۹	۳۶/۹۹	۳۸/۳۵
۲۲ مهر ۱۴۰۴	۱۴ تا ۲۲ مهر	۹	۱۵/۷۶	۲۴/۸۵	۷/۷۰	۰	۱۶/۹۶	۱۷۰/۴۸	۱/۹۸	۳۹/۳۲	۴۳/۷۹
۲۷ مهر ۱۴۰۴	۲۳ تا ۲۷ مهر	۵	۱۳/۶۰	۲۲/۶۰	۶/۴۴	۰	۳۷/۰۸	۸۳/۳۶	۲/۳۱	۱۸/۵۴	۲۲/۱۰
مجموع	کل دوره	۶۴	۱۸/۰۳	۲۷/۳۴	۹/۸۷	۰	۲۶/۵۲	۱۳۸۰/۵۸	۳/۴۴	۴۰۲/۸۳	۴۲۳/۹۳

منبع :داده‌های هواشناسی سال آزمایش از پایگاه NASA POWER و مقادیر بلندمدت تبخیر و تعرق مرجع از داده‌های ایستگاه هواشناسی کاشمر.

بر اساس داده‌های جدول ۵، میانگین دمای هوا در طول دوره بررسی از ۲۱/۶۴ درجه سلسیوس در نخستین بازه به ۱۳/۶۰ درجه سلسیوس در آخرین بازه کاهش یافت. به همین ترتیب، میانگین دمای بیشینه از ۳۱/۱۴ به ۲۲/۶۰ درجه سلسیوس و میانگین دمای کمینه از ۱۲/۹۳ به ۶/۴۴ درجه سلسیوس رسید. همچنین، در بازه‌های زمانی بررسی‌شده بارندگی ثبت‌شده صفر بود. این تغییرات نشان‌دهنده کاهش تدریجی دمای هوا در ادامه دوره رشد و اجرای تیمارهای آبیاری است. مجموع تبخیر-تعرق مرجع سال آزمایش و دوره بلندمدت نیز به‌ترتیب برابر با ۴۰۲/۸۳ و ۴۲۳/۹۳ میلی‌متر است. بنابراین ET_0 تجمعی دوره مورد بررسی در سال اجرای آزمایش حدود۴/۹۸ درصد کمتر از مقدار بلندمدت منطقه بوده است.

مجموع آب آبیاری فصل، با احتساب ۳۰۰ مترمکعب در هکتار آب استقرار، بین تیمارهای آزمایشی متفاوت بود. تیمار شاهد $V_0F_0G_0$ با دریافت ۳۷۹۳/۴۳ مترمکعب در هکتار، معادل ۳۷۹/۳۴ میلی‌متر، بیشترین آب آبیاری را دریافت کرد. در مقابل، تیمار $V_1F_1G_1$ با دریافت حدود ۲۱۷۲/۱۰ مترمکعب در هکتار، معادل ۲۱۷/۲۱ میلی‌متر، کمترین مقدار آب آبیاری را داشت. اختلاف این دو تیمار برابر با ۱۶۲۱/۳۳ مترمکعب در هکتار بود که کاهش ۴۲/۷۴ درصدی آب آبیاری نسبت به شاهد را نشان می‌دهد. تعداد نوبت‌های آبیاری در دوره اعمال تیمارها نیز از ۹ نوبت در شاهد به پنج نوبت در تیمار $V_1F_1G_1$ کاهش یافت (جدول ۶). در تیمارهای دارای حذف آبیاری در یک مرحله رشد، مقدار کاهش آب آبیاری فصل یکسان نبود. در تیمار$V_1F_0G_0$ ، حذف دو نوبت آبیاری در مرحله رویشی موجب کاهش ۲۳/۱۵ درصدی مجموع آب آبیاری نسبت به شاهد شد. در تیمارهای $V_0F_1G_0$ و$V_0F_0G_1$ ، حذف یک نوبت آبیاری در مراحل گلدهی و پر شدن دانه، به‌ترتیب با کاهش ۹/۶۶و ۹/۹۳ درصدی مجموع آب آبیاری همراه بود. همچنین، در تیمارهای دارای حذف آبیاری در دو مرحله، میزان کاهش آب نسبت به شاهد از ۱۹/۵۹ درصد در $V_0F_1G_1$ تا ۳۳/۰۸ درصد در $V_1F_0G_1$ متغیر بود. بنابراین، مقدار آب دریافتی تیمارها علاوه بر تعداد مراحل دارای محدودیت آبیاری، به تعداد نوبت‌های حذف‌شده و حجم آب متناظر با آن‌ها بستگی داشت.

جدول ۶. تاریخ‌های آبیاری، تعداد نوبت‌ها، حجم آب هر مرحله و مجموع آب آبیاری فصل در رژیم‌های مختلف آبیاری کینوا

تیمار آبیاری	مرحله رویشی (V)		مرحله گلدهی (F)		مرحله پر شدن دانه (G)		آب آبیاری استقرار	تعداد نوبت آبیاری	مجموع آب آبیاری فصل با احتساب استقرار		کاهش مجموع آب آبیاری نسبت به شاهد
	تاریخ آبیاری	حجم آب (متر مکعب بر هکتار)	تاریخ آبیاری	حجم آب (مترمکعب بر هکتار)	تاریخ آبیاری	حجم آب (مترمکعب بر هکتار)	متر مکعب بر هکتار	دوره اعمال تیمار	حجم کل آب (متر مکعب بر هکتار)	عمق کل (میلی متر)	درصد
$V_0F_0G_0$	۱، ۸ ، ۱۵، ۲۲ شهریور	۱۶۸۸/۳۱	۲۹ شهریور،۶ و ۱۳ مهر	۱۱۶۰/۶۶	۲۲، ۲۷ مهر	۶۴۴/۴۶	۳۰۰	۹	۳۷۹۳/۴۳	۳۷/۳۴۹	۰
$V_0F_1G_0$	۱، ۸ ، ۱۵، ۲۲ شهریور	۱۶۸۸/۳۱	۲۹شهریور و ۱۳ مهر	۷۹۴/۲۳	۲۲، ۲۷ مهر	۶۴۴/۴۶	۳۰۰	۸	۳۴۲۷	۳۴۲/۷	۹/۶۶
$V_0F_0G_1$	۱، ۸ ، ۱۵، ۲۲ شهریور	۱۶۸۸/۳۱	۲۹ شهریور،۶ و ۱۳ مهر	۱۱۶۰/۶۶	۲۷ مهر	۲۶۷/۸۸	۳۰۰	۸	۳۴۱۶/۸۴	۳۴/۶۸۱	۹/۹۳
$V_0F_1G_1$	۱، ۸ ، ۱۵، ۲۲ شهریور	۱۶۸۸/۳۱	۲۹شهریور و ۱۳ مهر	۷۹۴/۲۳	۲۷ مهر	۲۶۷/۸۸	۳۰۰	۷	۳۰۵۰/۴۱	۳۰/۰۴۵	۱۹/۵۹
$V_1F_0G_0$	۱، ۱۵ شهریور	۸۱۰	۲۹ شهریور،۶ و ۱۳ مهر	۱۱۶۰/۶۶	۲۲، ۲۷ مهر	۶۴۴/۴۶	۳۰۰	۷	۲۹۱۵/۱۲	۲۹/۵۱۱	۲۳/۱۵
$V_1F_1G_0$	۱، ۱۵ شهریور	۸۱۰	۲۹شهریور و ۱۳ مهر	۷۹۴/۲۳	۲۲، ۲۷ مهر	۶۴۴/۴۶	۳۰۰	۶	۲۵۴۸/۶۹	۲۵/۸۶۴	۳۲/۸۱
$V_1F_0G_1$	۱، ۱۵ شهریور	۸۱۰	۲۹ شهریور،۶ و ۱۳ مهر	۱۱۶۰/۶۶	۲۷ مهر	۲۶۷/۸۸	۳۰۰	۶	۲۵۳۸/۵۳	۲۵/۸۵۳	۳۳/۰۸
$V_1F_1G_1$	۱، ۱۵ شهریور	۸۱۰	۲۹شهریور و ۱۳ مهر	۷۹۴/۲۳	۲۷ مهر	۲۶۷/۸۸	۳۰۰	۵	۲۱۷۲/۱۰	۲۱/۲۱۷	۴۲/۷۴

تعداد نوبت‌ها مربوط به دوره اعمال تیمارهاست و دو آبیاری استقرار را شامل نمی‌شود. آب استقرار در همه رژیم‌ها برابر با ۳۰۰ مترمکعب در هکتار بود و در مجموع آب فصل لحاظ شد. حجم‌های مربوط به مراحل رشد، مجموع آب هر مرحله هستند، نه حجم تک‌تک نوبت‌ها. درصد کاهش آب فصل نسبت به شاهد $V_0F_0G_0$ محاسبه شد. تعریف کدهای آبیاری مطابق جدول ۱ است.

مقایسه آب اعمال‌شده در دو وضعیت آبیاری هر مرحله نشان داد که بیشترین کاهش مطلق آب، معادل ۸۷۸/۳۱ مترمکعب در هکتار، مربوط به مرحله رویشی بود. در مقابل، بیشترین کاهش نسبی آب در مقایسه با برنامه بدون حذف همان مرحله، در مرحله پر شدن دانه مشاهده شد. کاهش آب در مراحل رویشی، گلدهی و پر شدن دانه به‌ترتیب برابر با ۵۲/۰۲، ۳۱/۵۷ و ۵۸/۴۳ درصد بود (جدول ۷).

جدول ۷. کاهش مطلق و نسبی آب آبیاری در هر مرحله رشد نسبت به وضعیت بدون حذف آبیاری در همان مرحله

مرحله رشد	آب آبیاری در وضعیت بدون حذف، مترمکعب در هکتار	آب آبیاری در وضعیت دارای حذف، مترمکعب در هکتار	کاهش مطلق، مترمکعب در هکتار	کاهش نسبی، درصد
رویشی، V	۱۶۸۸/۳۱	۸۱۰	۸۷۸/۳۱	۵۲/۰۲
گلدهی، F	۱۱۶۰/۶۶	۷۹۴/۲۳	۳۶۶/۴۳	۳۱/۵۷
پر شدن دانه، G	۶۴۴/۴۶	۲۶۷/۸۸	۳۷۶/۵۸	۵۸/۴۳

درصد کاهش در هر ردیف نسبت به مقدار آب آبیاری در وضعیت بدون حذف همان مرحله محاسبه شده است و با درصد کاهش مجموع آب آبیاری فصل تفاوت دارد.

در تفسیر پاسخ‌های گیاه باید توجه داشت که مقدار آب حذف‌شده در مراحل مختلف برابر نبود؛ در مرحله رویشی دو نوبت و در هر یک از مراحل گلدهی و پر شدن دانه یک نوبت آبیاری حذف شد. بنابراین، تفاوت پاسخ گیاه بین این تیمارها باید با توجه به زمان اعمال

محدودیت و مقدار آب حذف‌شده تفسیر شود. درصدهای گزارش‌شده در جدول ۷ صرفاً کاهش آب آبیاری اعمال‌شده را نشان می‌دهند و به‌تنهایی بیانگر شدت تنش آبی یا حساسیت گیاه در هر مرحله نیستند. حجم آب گزارش‌شده، آب اعمال‌شده به کرت‌هاست و نباید معادل تبخیر–تعرق واقعی یا آب جذب‌شده توسط گیاه در نظر گرفته شود. همچنین، یکسان‌بودن آب استقرار موجب شد افزودن آن، اختلاف مطلق آب آبیاری بین تیمارها را تغییر ندهد؛ بااین‌حال، این مقدار در محاسبه درصد کاهش مجموع آب آبیاری نسبت به شاهد و بهره‌وری آب آبیاری لحاظ شد.

تجزیه واریانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیم آبیاری بر تمامی صفات مورد بررسی، شامل زیست‌توده تر، ماده خشک، تعداد بوته، ارتفاع بوته، قطر ساقه، طول گل‌آذین‌دار بوته، تعداد گل‌آذین، تعداد شاخه‌های جانبی، عملکرد دانه، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب آبیاری، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). اثر مصرف سولفات پتاسیم نیز بر تمامی صفات معنی‌دار شد. این اثر برای نسبت شاخص برداشت در سطح احتمال پنج درصد و برای سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش رژیم آبیاری × سولفات پتاسیم برای عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد و برای سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برای عملکرد دانه، آماره F برهم‌کنش برابر با ۲/۶۵ و مقدار احتمال آن برابر با ۰/۰۱۱۱ بود. معنی‌داری برهم‌کنش‌ها نشان داد که پاسخ صفات به مصرف سولفات پتاسیم به رژیم آبیاری وابسته بود. ازاین‌رو، تفسیر نتایج در بخش‌های بعد بر بررسی ترکیب‌های رژیم آبیاری و سطح مصرف سولفات پتاسیم متمرکز شد و اثرهای اصلی با توجه به برهم‌کنش آن‌ها تفسیر شدند.

جدول ۸. میانگین مربعات تجزیه واریانس صفات کینوا تحت تأثیر رژیم آبیاری، مصرف سولفات پتاسیم و برهم‌کنش آن‌ها

صفت	تکرار (۲)	آبیاری (۷)	خطای کرت اصلی (۱۴)	سولفات پتاسیم (۲)	سولفات آبیاری×پتاسیم (۱۴)	خطای کرت فرعی (۳۲)	CV (٪)
عملکرد زیست‌توده تر (تن در هکتار)	۱/۱۷۱۲۸۵	۱۸۳/۵۰۴۳۶**	۰/۰۵۸۵۸۶	۱۶/۶۴۲۶۳۹**	۰/۵۱۷۴۴**	۰/۰۴۷۰۴۹	۱/۶۲۶
عملکرد (تن در هکتار) ماده خشک	۰/۹۸۰۲۴۳۱	۷۷/۹۸۱۹۸۴۱**	۰/۱۶۹۸۸۵۹	۷/۱۰۵۸۶۸۱**	۰/۵۳۳۴۸۷۱**	۰/۰۹۲۰۱۳۹	۳/۶۴۱
تعداد بوته در دو مترمربع	۳/۰۴۱۶۶۷	۲۴۶/۱۴۰۸۷۳**	۰/۳۹۰۸۷۳	۳۲/۷۹۱۶۶۷**	۲/۲۸۳۷۳**	۰/۳۶۸۰۵۶	۳/۱۵۸
ارتفاع بوته (سانتی متر)	۷۳/۰۱۳۸۹	۵۳۲۷/۶۱۱۱۱**	۷/۵۶۹۴۴	۵۶۴/۱۴۹۳۱**	۴۸/۱۹۲۹۶**	۴/۳۲۲۹۲	۱/۶۸۵
قطر ساقه (میلی متر)	۷/۶۲۵	۵۸۸/۸۰۷۵۴۰**	۰/۶۸۸۴۹۲	۴۸/۲۹۱۶۶۷**	۳/۴۵۰۳۹۷**	۰/۲۶۳۸۸۹	۲/۱۵۹
طول بخش گل‌آذین‌دار بوته (سانتی متر)	۸۳/۰۱۰۴۲	۷۱۹۳/۱۲۶۴۹**	۴/۶۱۷۵۶	۶۰۶/۶۳۵۴۲**	۴۳/۳۴۹۷**	۲/۸۹۰۶۲	۲/۰۶۴
تعداد گل‌آذین در بوته	۳/۲۹۵۱۳۹	۴۵۳/۳۳۹۲۸۶**	۰/۲۰۳۸۶۹	۴۶/۲۱۱۸۰۶**	۳/۷۶۳۳۹۳**	۰/۰۷۹۸۶۱	۱/۴۱۴
شاخه جانبی در بوته تعداد	۱/۹۰۶۲۵	۱۸۸/۳۲۴۹۰۱**	۰/۳۴۲۷۵۸	۱۵/۸۷۵**	۱/۳۳۵۳۱۷**	۰/۱۳۷۱۵۳	۵/۶۷۹
عملکرد دانه (تن در هکتار)	۰/۰۶۶۳۷۲۳۵	۳/۳۴۵۲۸۰۲۴**	۰/۰۱۳۲۷۱۶۵	۰/۳۰۴۸۱۶۰۱**	۰/۰۲۸۰۱۶۱۷*	۰/۰۱۰۵۶۰۰۸	۷/۰۳۴
وزن هزار دانه (گرم)	۰/۰۰۳۴۷۲۲۲	۰/۲۳۱۷۴۶۰۳**	۰/۰۰۰۶۱۵۰۸	۰/۰۲۰۹۷۲۲۲**	۰/۰۰۲۸۷۶۹۸**	۰/۰۰۰۵۵۵۵۶	۰/۸۸۷۶
شاخص برداشت (درصد)	۱/۱۶۷۲۸۹۲	۱۶/۰۷۶۱۸۵۹**	۰/۴۹۳۶۳۶۶	۲/۱۴۸۹۴۹۶*	۳/۲۱۱۷۵۲۸**	۰/۴۳۸۰۰۲۸	۳/۸۵۲
بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۰۶۷۱۶۶۷	۰/۱۳۲۶۳۳۱۳**	۰/۰۰۱۰۶۱۱۱	۰/۰۳۲۴۲۹۱۷**	۰/۰۰۲۵۰۲۱۸**	۰/۰۰۰۷۶۸۰۶	۵/۸۸۱

اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده درجات آزادی منابع تغییرات هستند. علامت‌های * و ** به‌ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد هستند. اثر رژیم آبیاری با خطای کرت اصلی و اثر سولفات پتاسیم و برهم‌کنش آبیاری × سولفات پتاسیم با خطای کرت فرعی آزمون شدند. CV نشان‌دهنده ضریب تغییرات است. میانگین مربعات هر صفت بر مبنای مجذور واحد اندازه‌گیری آن گزارش شده است.

صفات رشد و ساختار بوته

اثر رژیم آبیاری، سولفات پتاسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر تمامی صفات رشد و ساختار بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). بنابراین، پاسخ‌ها بر اساس ترکیب‌های تیماری تفسیر شدند. برای بررسی نقش الگوی زمانی حذف آبیاری، رژیم‌های دارای حجم نزدیک آب نیز مقایسه شدند. حجم‌های گزارش‌شده شامل آب آبیاری استقرار هستند.

تعداد بوته، ارتفاع و قطر ساقه

میانگین تعداد بوته در سطح برداشت دو مترمربعی از ۲۷/۷۸ بوته در شاهد $V_0F_0G_0$ به ۱۱/۴۴ بوته در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت که معادل ۵۸/۸۰ درصد کاهش بود (شکل a۲). پاسخ این صفت به سولفات پتاسیم به رژیم آبیاری وابسته بود؛ در شاهد، میانگین تعداد بوته در K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب ۲۵، ۲۷/۳۳ و ۳۱ و در $V_1F_1G_1$ به‌ترتیب ۹/۶۷، ۱۱/۶۷ و ۱۳ بود و سطوح کود در هر دو رژیم تفاوت معنی‌دار داشتند. در مقابل، مقادیر ۱۹، ۲۰ و ۲۰ بوته در $V_0F_1G_1$ از نظر آماری متفاوت نبودند. ازآنجاکه جمعیت اولیه سطح برداشت و تغییرات آن طی فصل ثبت نشده بود، این اختلاف‌ها صرفاً بیانگر تعداد بوته موجود هنگام برداشت هستند و نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً معادل تلفات بوته دانست. میانگین ارتفاع و قطر ساقه در شاهد به‌ترتیب ۱۵۵/۷۸ سانتی‌متر و ۳۶/۱۱ میلی‌متر بود و در $V_1F_1G_1$ به ۸۰/۲۸ سانتی‌متر و ۱۰/۵۶ میلی‌متر رسید؛ بنابراین، این دو صفت به‌ترتیب ۴۸/۴۷ و ۷۰/۷۷ درصد کاهش یافتند (شکل‌های b۲ و c۲). مصرف سولفات پتاسیم در برخی ترکیب‌ها موجب افزایش معنی‌دار این صفات شد، اما افزایش سطح کود همواره پاسخ بیشتری ایجاد نکرد. برای مثال، ارتفاع شاهد در K_0 وK_1 ، به‌ترتیب ۱۴۹/۳۳ و ۱۵۲/۵ سانتی‌متر، تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی در K_2 به ۱۶۵/۵۰سانتی‌متر افزایش یافت. همچنین، قطر ساقه در $V_0F_1G_1$ از ۲۵/۳۳ میلی‌متر در K_0 به ۲۷ میلی‌متر در هر دو سطح K_1 و K_2 رسید. مقایسه رژیم‌های دارای حجم نزدیک آب نیز تفاوت رشد بوته را نشان داد. رژیم‌های $V_1F_1G_0$ و $V_1F_0G_1$ به‌ترتیب حدود ۲۵۴۸/۶۸ و ۲۵۳۸/۵۲ مترمکعب آب در هکتار دریافت کردند، اما میانگین ارتفاع در آن‌ها ۱۱۴/۵ و ۱۰۱/۸۹ سانتی‌متر و قطر ساقه ۲۰/۴۴ و ۱۶/۲۲ میلی‌متر بود. در هر سه سطح کود، هر دو صفت در رژیم نخست بیشتر بودند. بنابراین، حجم کل آب به‌تنهایی برای توضیح اختلاف رشد این رژیم‌ها کافی نبود. کاهش ارتفاع و قطر ساقه با نتایج میرصافی و همکاران (۲۰۲۴) هم‌جهت بود؛ آنان در تأمین ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی، کاهش ارتفاع را به‌ترتیب ۶/۱ و ۱۶/۷ درصد و کاهش قطر ساقه را ۶/۴ و ۲۴/۵ درصد گزارش کردند.

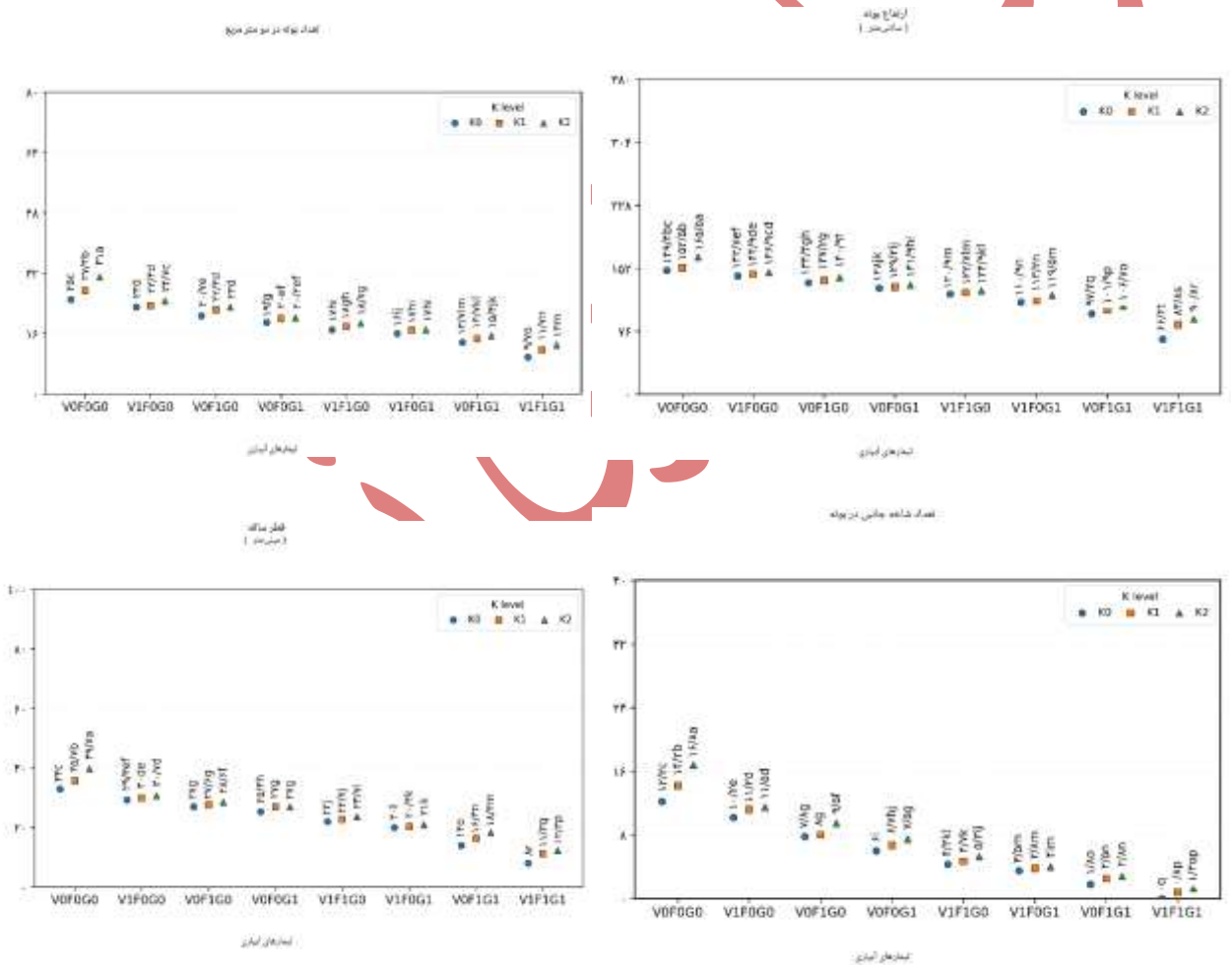
تعداد شاخه‌های جانبی و گل‌آذین

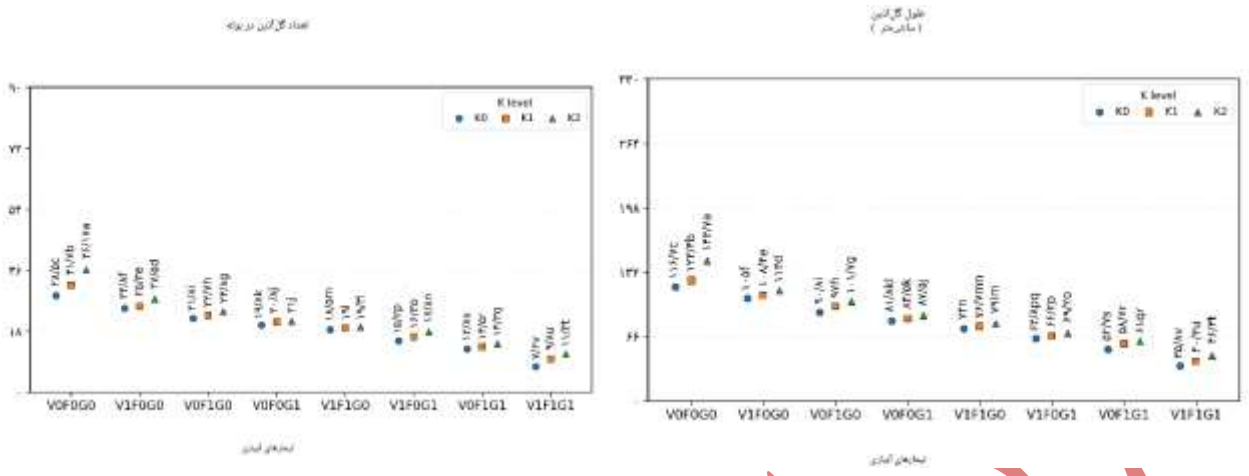
میانگین تعداد شاخه‌های جانبی از ۱۴/۳۹ شاخه در شاهد به ۰/۷۲ شاخه در بوته در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت که معادل ۹۴/۹۸درصد کاهش بود(شکل d۲). در رژیم اخیر، تعداد شاخه‌ها در K_0 صفر و در K_1 و K_2 به‌ترتیب ۰/۸۳ و ۱/۳۳ بود؛ دو سطح کوددار با K_0 تفاوت معنی‌دار داشتند، اما اختلاف آن‌ها با یکدیگر معنی‌دار نبود. همچنین، در $V_1F_1G_0$، مقادیر ۳/۵، ۳/۸۳ و ۴ شاخه در سه سطح کود اختلاف معنی‌داری نداشتند. بنابراین، افزایش مصرف سولفات پتاسیم در همه رژیم‌ها به افزایش معنی‌دار شاخه‌دهی منجر نشد. تعداد گل‌آذین نیز از میانگین ۳۲/۱۱ در شاهد به ۹/۶۱ عدد در بوته در $V_1F_1G_1$ رسید و ۷۰/۰۷ درصد کاهش یافت (شکل e۲). برخلاف شاخه‌های جانبی، تعداد گل‌آذین در $V_1F_1G_1$ بین هر سه سطح کود تفاوت معنی‌دار داشت و در K_0، K_1و K_2 به‌ترتیب ۷/۶۷، ۹/۸۳ و ۱۱/۳۳ بود. این تفاوت نشان می‌دهد که پاسخ تعداد گل‌آذین را نمی‌توان صرفاً با تغییر شاخه‌دهی توضیح داد. بیشترین تعداد گل‌آذین، برابر با ۳۶/۱۷ عدد در بوته، در $V_0F_0G_0 \times K_2$ ثبت شد. میرصافی و همکاران (۲۰۲۴) نیز کاهش تعداد پانیکول را در تأمین ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب ۱۸/۴ و ۳۶/۵ درصد گزارش کردند. بااین‌حال، چون تعداد دانه در هر گل‌آذین اندازه‌گیری نشد، سهم مستقل کاهش گل‌آذین در افت عملکرد دانه قابل تعیین نبود.

طول بخش گل‌آذین‌دار بوته

بیشترین و کمترین طول بخش گل‌آذین‌دار بوته، به‌ترتیب ۱۴۳/۱۷ و ۳۵/۸۳ سانتی‌متر، در ترکیب‌های $V_0F_0G_0 \times K_2$ و $V_1F_1G_1 \times K_0$ثبت شدند. میانگین این صفت از ۱۲۷/۷۲ سانتی‌متر در شاهد به ۴۰/۸۳ سانتی‌متر در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت که معادل ۶۸/۰۳

درصد کاهش بود (شکل f۲). پاسخ به افزایش کود نیز بین رژیم‌ها تفاوت داشت؛ در $V_1F_0G_1$ ، مقادیر K_1 و K_2 ، به‌ترتیب ۵۸/۶۷ و ۶۱ سانتی‌متر، اختلاف معنی‌داری نداشتند، درحالی‌که افزایش از ۶۶/۱۷ به ۶۹/۱۷ سانتی‌متر در $V_1F_1G_0$ معنی‌دار بود. میرصافی و همکاران (۲۰۲۴) کاهش طول پانیکول اصلی را در تأمین ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی به‌ترتیب ۱۸/۶ و ۳۳/۶ درصد گزارش کردند. جهت پاسخ مشابه بود، اما به‌دلیل تفاوت تعریف طول پانیکول اصلی با فاصله اندازه‌گیری‌شده در پژوهش حاضر، مقایسه مستقیم دامنه کاهش این دو صفت امکان‌پذیر نیست. در مجموع، حذف آبیاری با کاهش صفات رشد و ساختار بوته همراه بود و مصرف سولفات پتاسیم در برخی ترکیب‌ها موجب بهبود این صفات شد؛ بااین‌حال، افزایش سطح کود همواره پاسخ معنی‌دار بیشتری ایجاد نکرد. تفاوت پاسخ رژیم‌های دارای حجم آب نزدیک، اهمیت الگوی زمانی حذف آبیاری را نشان می‌دهد. بااین‌حال، به‌دلیل نابرابری مقدار آب حذف‌شده میان مراحل رشد و نبود اندازه‌گیری مستقیم فرایندهای فیزیولوژیک، این نتایج برای تعیین حساسیت ذاتی مراحل رشد یا اثبات سازوکار پاسخ گیاه کافی نیستند. ارزیابی مدیریتی رژیم‌های آبیاری در کنار عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری انجام شد.





شکل ۲. اثر رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم بر تعداد بوته در دو مترمربع (a)، ارتفاع بوته (b)، قطر ساقه (c)، تعداد شاخه جانبی در بوته (d)، تعداد گل‌آذین در بوته (e) و طول بخش گل‌آذین‌دار بوته (f). نقاط، میانگین سه تکرار و حروف، گروه‌بندی آماری مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال پنج درصد را نشان می‌دهند. خطای استاندارد در شکل نمایش داده نشده است. V، F و G به‌ترتیب دوره‌های رویشی، گلدهی و پرشدن دانه و اعداد صفر و یک به‌ترتیب حفظ تمام نوبت‌های برنامه‌ریزی‌شده و حذف نوبت‌های تعیین‌شده را نشان می‌دهند. K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب مصرف فصلی صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار هستند.

تولید زیست‌توده و عملکرد دانه

اثر رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم بر زیست‌توده تر، ماده خشک، عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. برهم‌کنش آن‌ها نیز برای عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد و برای سه صفت دیگر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۸). بنابراین، پاسخ تولیدی بر اساس مقایسه ترکیب‌های تیماری بررسی شد (جدول ۹).

زیست‌توده تر و ماده خشک

میانگین زیست‌توده تر از ۲۰/۲۵ تن در هکتار در شاهد آبیاری به ۶/۰۲ تن در هکتار در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت. میانگین ماده خشک نیز از ۱۲/۸۴ به ۳/۸۲ تن در هکتار رسید؛ این تغییرات به‌ترتیب معادل ۷۰/۲۶ و ۷۰/۲۸ درصد کاهش بودند. بنابراین، افت تولید در رژیم اخیر صرفاً به وزن تر محدود نبود و کاهش تجمع ماده خشک نیز مشاهده شد. پاسخ این دو صفت به سولفات پتاسیم در همه رژیم‌ها یکسان نبود. در شاهد، زیست‌توده تر در K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب ۱۹/۳۸، ۲۰/۴۰ و ۲۰/۹۷ تن در هکتار و ماده خشک ۱۱/۹۴، ۱۲/۱۲ و ۱۴/۴۷ تن در هکتار بود و در هر دو صفت، سه سطح کود تفاوت معنی‌دار داشتند. افزایش مصرف از K_0 به K_2، زیست‌توده تر را ۸/۱۷ درصد و ماده خشک را ۲۱/۱۹ درصد افزایش داد. در مقابل، در $V_1F_0G_0$، افزایش زیست‌توده تر از ۱۱/۷۷ تن در هکتار در K_0 به ۱۳/۱۰ تن در هکتار در K_1 معنی‌دار بود، اما ماده خشک با مقادیر ۷/۵۰، ۷/۴۴ و ۷/۷۱ تن در هکتار در K_0، K_1 و K_2، در سه سطح کود تفاوت معنی‌داری نداشت. ازاین‌رو، افزایش وزن تر الزاماً بیانگر افزایش معنی‌دار تجمع ماده خشک نبود. در $V_1F_1G_1$ نیز زیست‌توده تر در هر سه سطح کود متفاوت بود و از ۴/۵۸ تن در هکتار در K0 به ۷/۴۳ تن در هکتار در K_2 رسید. بااین‌حال، ماده خشک در K_0 و K_1، به‌ترتیب ۲/۸۸ و ۳/۵۶ تن در هکتار، اختلاف معنی‌داری نداشت و تنها مقدار K_2، برابر با ۵/۰۱ تن در هکتار، از دو سطح دیگر بیشتر بود. این پاسخ به سطوح بررسی‌شده محدود است و تعیین‌کننده مقدار بهینه کود نیست. کاهش ماده خشک با نتایج میرصافی و همکاران (۲۰۲۴) هم‌جهت بود؛ آنان در تأمین ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی، بسته به روش کاشت، به‌ترتیب کاهش ۳ تا ۱۷ و ۱۱ تا ۳۰ درصدی ماده خشک کل را گزارش کردند. دامنه بیشتر کاهش در پژوهش حاضر باید با توجه به تفاوت شرایط محیطی، رقم و روش اعمال محدودیت آب تفسیر شود.

عملکرد دانه و وزن هزار دانه

میانگین عملکرد دانه از ۲/۴۶۱ تن در هکتار در شاهد به ۰/۵۵۸ تن در هکتار در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت که معادل ۷۷/۳۱ درصد بود. در همین مقایسه، وزن هزار دانه از ۲/۹۱۱ به ۲/۴۲۲ گرم رسید و ۱۶/۷۹ درصد کاهش یافت. بنابراین، افت عملکرد دانه را نمی‌توان تنها با کاهش وزن دانه توضیح داد. کاهش نسبی عملکرد دانه از کاهش زیست‌توده تر و ماده خشک نیز بیشتر بود. بیشترین عملکرد دانه، برابر با ۲/۸۲۹ تن در هکتار، در $V_0F_0G_0 \times K_2$ و کمترین مقدار، برابر با ۰/۳۹۸ تن در هکتار، در $V_1F_1G_1 \times K_0$ ثبت شد. در هر دو رژیم شاهد و $V_1F_1G_1$ ، عملکرد دانه در K_2 از دو سطح دیگر بیشتر بود. افزایش عملکرد از K_0 به K_2 در این دو رژیم به‌ترتیب ۲۶/۷۹ و ۸۷/۶۹ درصد بود؛ بااین‌حال، عملکرد K_2 در $V_1F_1G_1$ همچنان کمتر از شاهد بدون کود باقی ماند. افزایش مصرف کود در همه رژیم‌ها موجب افزایش معنی‌دار عملکرد نشد. در$V_0F_0G_1$، $V_0F_1G_1$و $V_1F_0G_0$ ، سه سطح کود از نظر عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری نداشتند. همچنین، در $V_0F_1G_0$، عملکرد از ۱/۸۹۲ تن در هکتار در K_0 به ۲/۰۹۸ تن در هکتار در K_2 افزایش معنی‌دار یافت، درحالی‌که وزن هزار دانه در هر سه سطح ۲/۸ گرم بود. بنابراین، پاسخ عملکرد به کود همواره با تغییر وزن هزار دانه همراه نبود. تتاروال و همکاران (۲۰۲۵) نیز در بررسی ترکیب آرایش زمین و برنامه آبیاری، دامنه عملکرد دانه ۱/۶۹۵ تا ۳/۱۸۸ تن در هکتار و وزن هزار دانه ۲/۳۷ تا ۳/۲۹ گرم را گزارش کردند. در پژوهش حاضر نیز در برخی ترکیب‌های تیماری، تفاوت معنی‌دار عملکرد دانه بدون تغییر معنی‌دار وزن هزار دانه مشاهده شد. با توجه به اندازه‌گیری‌نشدن تعداد دانه و درصد تشکیل دانه، منشأ دقیق این تفاوت قابل تعیین نیست. نتایج حاضر پاسخ تولیدی گیاه را نشان می‌دهند، اما برای اثبات تغییر فرایندهایی مانند فتوسنتز یا انتقال مواد فتوسنتزی کافی نیستند.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم بر صفات تولیدی کینوا

رژیم آبیاری	عملکرد زیست توده تر (تن در هکتار)			عملکرد ماده خشک (تن در هکتار)			عملکرد دانه (تن در هکتار)			وزن هزار دانه (گرم)		
	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2	K_0	K_1	K_2
$V_0F_0G_0$	۱۹/۳۸c	۲۰/۴b	۲۰/۹۷a	۱۱/۹۴c	۱۲/۱۲b	۱۴/۴۷a	۲/۲۳۱bc	۲/۳۲۲b	۲/۸۲۹a	۲/۸۷b	۲/۹b	۲/۹۷a
$V_0F_1G_0$	۱۶/۴f	۱۷/۳۸e	۱۸/۶۷d	۱۰/۲۶ef	۱۰/۸۲de	۱۱/۳۲cd	۱/۸۹۲ef	۱/۹۹۸de	۲/۰۹۸cd	۲/۸c	۲/۸c	۲/۸c
$V_0F_0G_1$	۱۴/۹۸h	۱۵/۴۷g	۱۶/۰۸f	۹/۳۸gh	۹/۸۱g	۱۰/۰۲f	۱/۶۹۴ghi	۱/۷۸۳fgh	۱/۸۳۱efg	۲/۷d	۲/۷d	۲/۷۷c
$V_0F_1G_1$	۱۳/۴۲j	۱۳/۸۲i	۱۴/۶۵h	۸/۰۶jk	۸/۶۲ij	۸/۹۷hi	۱/۴۴۶jk	۱/۵۵۰ij	۱/۶۱۴hij	۲/۷d	۲/۷d	۲/۷d
$V_1F_0G_0$	۱۱/۷۷k	۱۳/۱j	۱۳/۲j	۷/۵lmn	۷/۴۴klm	۷/۷۱kl	۱/۲۵۲lmn	۱/۲۹۶klm	۱/۳۴۸kl	۲/۶e	۲/۶e	۲/۶۷d
$V_1F_1G_0$	۱۱m	۱۱/۳۷l	۱۱/۵۲kl	۶/۵۰op	۶/۶۲mnop	۷/۱۰mno	۱/۰۶۲opq	۱/۰۸۷nop	۱/۱۷۳mno	۲/۵f	۲/۶e	۲/۶e
$V_1F_0G_1$	۸/۲۲p	۹/۸۷o	۱۰/۴۸n	۵/۹۹r	۶/۱۸q	۶/۳۶p	۰/۸۹۵qr	۰/۹۷۴pq	۱/۰۱۵opq	۲/۵f	۲/۵f	۲/۵f
$V_1F_1G_1$	۴/۵۸s	۶/۰۵۲r	۷/۴۳q	۲/۸۸t	۳/۵۶t	۵/۰۱s	۰/۳۹۸s	۰/۵۳s	۰/۷۴۷r	۲/۳۷g	۲/۴g	۲/۵f

مقادیر، میانگین سه تکرار هستند. برای هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در گروه‌بندی ارائه‌شده تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند. حروف میان صفات مختلف قابل مقایسه نیستند. زیست‌توده تر شامل دانه است و ماده خشک از خشک‌کردن همان نمونه‌ها در هوای آزاد به دست آمده است. K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب مصرف فصلی صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار را نشان می‌دهند. تعریف کدهای آبیاری مطابق جدول ۱ است.

بهره‌وری آب آبیاری و شاخص برداشت

بهره‌وری آب آبیاری و ارتباط آن با تولید

کاهش آب آبیاری الزاماً با افزایش بهره‌وری آب همراه نبود. میانگین بهره‌وری آب آبیاری از ۰/۶۴۹کیلوگرم بر مترمکعب در شاهد به ۰/۲۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت؛ بنابراین، رژیم اخیر با وجود دریافت آب کمتر، به ازای واحد آب حدود ۶۰/۵۸ درصد دانه کمتری تولید کرد. این نتیجه با افت بیشتر عملکرد دانه در مقایسه با کاهش آب آبیاری سازگار بود. در این پژوهش، آب استقرار نیز در محاسبه مجموع آب فصل منظور شد. اثر رژیم آبیاری، سولفات پتاسیم و برهم‌کنش آن‌ها بر بهره‌وری آب آبیاری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). بیشترین و کمترین مقدار، به‌ترتیب ۰/۷۴۶ و ۰/۱۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب، در ترکیب‌های $V_0F_0G_0 \times K_2$ و $V_1F_1G_1 \times K_0$ ثبت شدند. در شاهد، مقادیر K_0 وK_1 ، به‌ترتیب ۰/۵۸۸ و ۰/۶۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب، تفاوت معنی‌داری نداشتند و اما مقدار K_2 از هر دو بیشتر بود. در$V_1F_1G_1$ ، مقادیر K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب ۰/۱۸۳، ۰/۲۴۴ و ۰/۳۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب بودند و هر سه سطح تفاوت معنی‌دار داشتند؛ درحالی‌که در $V_1F_0G_0$ اختلاف سطوح کود معنی‌دار نبود (جدول ۱۰). بررسی هم‌زمان صفات تولیدی نشان داد که افزایش زیست‌توده الزاماً با بهبود بهره‌وری آب همراه نیست. برای نمونه، در$V_1F_0G_0$ ،

افزایش زیست‌توده تر از K_0 به K_1 معنی‌دار بود، اما ماده خشک، عملکرد دانه و بهره‌وری آب در سه سطح کود تفاوت معنی‌داری نداشتند. همچنین، در شاهد، افزایش کود از K_0 به K_1 زیست‌توده تر و ماده خشک را افزایش داد، ولی عملکرد دانه و بهره‌وری آب تغییر معنی‌داری نشان ندادند. در هر رژیم، مقدار آب آبیاری در سطوح کود یکسان بود؛ بنابراین، تغییرات بهره‌وری آب مستقیماً از تغییرات عملکرد دانه پیروی می‌کرد و هم‌جهتی آن‌ها شاهد مستقلی برای تغییر جذب آب یا فرایندهای فیزیولوژیک نیست. شاخص حاضر نیز بر مبنای آب آبیاری اعمال‌شده محاسبه شده و با بهره‌وری مبتنی بر تبخیر–تعرق یکسان نیست. لی و همکاران (۲۰۲۵) نیز با بررسی سه سطح آبیاری ۲۱۰۰، ۲۷۰۰ و ۳۳۰۰ مترمکعب در هکتار و پنج سطح نیتروژن، ترکیب ۲۷۰۰ مترمکعب آب و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار را برای شرایط آزمایش خود پیشنهاد کردند. این نتیجه بر ضرورت بررسی مشترک تولید و بهره‌وری منابع تأکید دارد؛ هرچند به‌دلیل تفاوت عنصر غذایی و برنامه آبیاری، توصیه آن پژوهش مستقیماً به شرایط مطالعه حاضر قابل تعمیم نیست.

شاخص برداشت

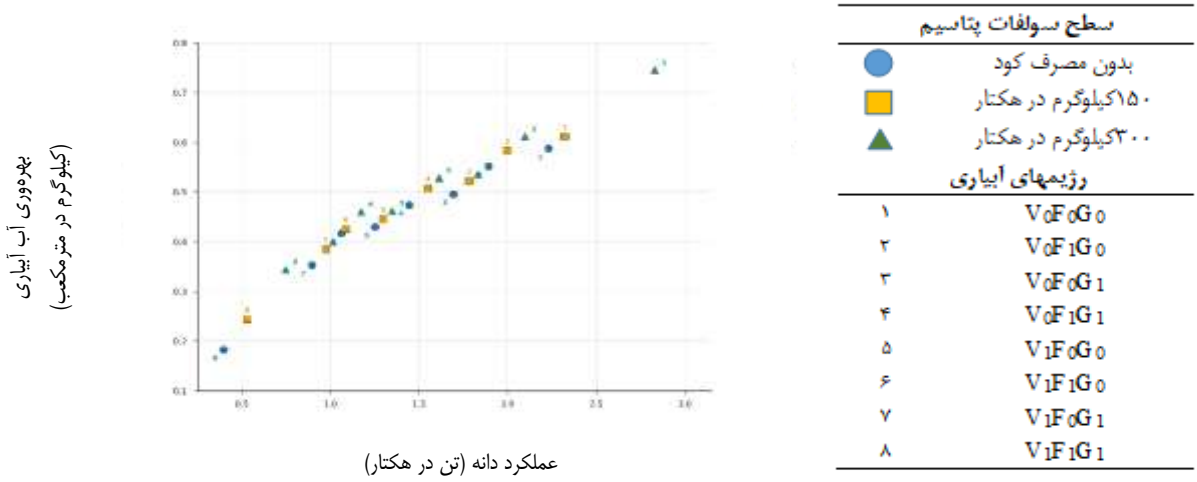
در این پژوهش، شاخص برداشت بر مبنای نسبت عملکرد دانه به عملکرد ماده خشک اندام هوایی شامل دانه محاسبه شد؛ بنابراین، مقادیر آن باید با توجه به همین مبنا تفسیر شوند. بر اساس جدول ۱۰، میانگین شاخص برداشت از حدود ۱۹/۱۳ درصد در شاهد به ۱۴/۵۳ درصد در $V_1F_1G_1$ کاهش یافت که معادل حدود ۲۴/۰۵ درصد کاهش نسبی بود. اثر رژیم آبیاری و برهم‌کنش آبیاری × سولفات پتاسیم بر شاخص برداشت در سطح احتمال یک درصد و اثر سولفات پتاسیم در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۸). در شاهد، مقدار K_2 برابر با ۱۹/۵۵ درصد بود و از مقدار آن در K_0 ، برابر با ۱۸/۶۸ درصد، به‌طور معنی‌داری بیشتر بود؛ بااین‌حال، با مقدار K_1، برابر با ۱۹/۱۵ درصد، تفاوت معنی‌داری نداشت. در مقابل، در $V_1F_1G_1$ ، مقادیر K_0 ، K_1 و K_2 به‌ترتیب ۱۳/۸۰، ۱۴/۸۹ و ۱۴/۹۲ درصد بودند به‌طوری‌که مقادیر K_1 و K_2 تفاوت معنی‌داری نداشتند، اما هر دو از K_0 بیشتر بودند. در سایر رژیم‌های آبیاری نیز سطوح کود در هر رژیم دارای حروف مشترک بودند و تفاوت معنی‌داری نشان ندادند. بیشتربودن شاخص برداشت الزاماً بیانگر عملکرد دانه بیشتر در واحد سطح نبود. برای نمونه، میانگین این شاخص در $V_1F_0G_0$ حدود ۱۷/۲۱ درصد و در $V_0F_1G_0$ حدود ۱۸/۵۰ درصد بود؛ درحالی‌که میانگین عملکرد دانه در این دو رژیم، بر اساس جدول ۹، به‌ترتیب حدود ۱/۲۹۹ و ۱/۹۹۶ تن در هکتار بود. این مقایسه توصیفی نشان می‌دهد که رتبه‌بندی رژیم‌ها بر مبنای یک نسبت، لزوماً با رتبه‌بندی آن‌ها بر مبنای تولید دانه یکسان نیست. در مجموع، شاخص برداشت باید در کنار عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب بررسی شود. تغییر این نسبت به‌تنهایی برای نتیجه‌گیری درباره برتری مدیریتی یک رژیم کافی نیست. همچنین، از آنجا که مخرج شاخص برداشت در این پژوهش ماده خشک کل اندام‌های هوایی، شامل دانه، بوده است، تفسیر تغییرات آن باید بر مبنای نسبت عملکرد دانه‌ی خشک به ماده خشک کل اندام‌های هوایی انجام شود.

جدول ۱۰. مقایسه میانگین ترکیب‌های رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم برای بهره‌وری آب آبیاری و شاخص برداشت

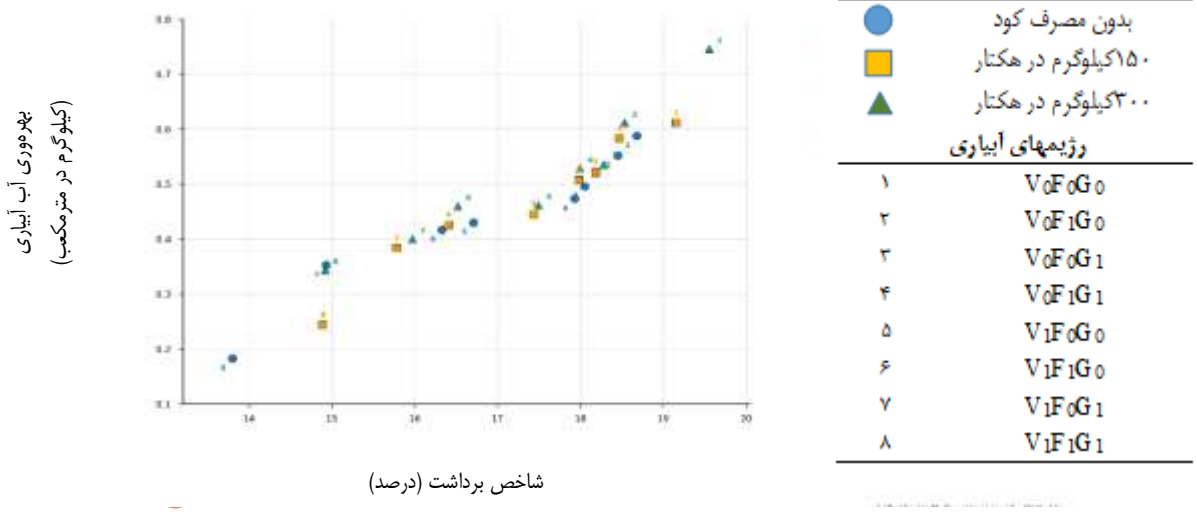
رژیم آبیاری	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب)			شاخص برداشت (درصد)		
	K۰	K۱	K۲	K۰	K۱	K۲
$V_0F_0G_0$	۰/۵۸۸bc	۰/۶۱۲b	۰/۷۴۶a	۱۸/۶۸abc	۱۹/۱۵ab	۱۹/۵۵a
$V_0F_1G_0$	۰/۵۵۲cd	۰/۵۸۳bc	۰/۶۱۲b	۱۸/۴۵abcde	۱۸/۴۷abcde	۱۸/۵۳abcd
$V_0F_0G_1$	۰/۴۹۶efg	۰/۵۲۲de	۰/۵۳۶de	۱۸/۰۵bcde	۱۸/۱۸bcde	۱۸/۲۸bcde
$V_0F_1G_1$	۰/۴۷۴fgh	۰/۵۰۸ef	۰/۵۲۹de	۱۷/۹۳cde	۱۷/۹۸cde	۱۷/۹۹cde
$V_1F_0G_0$	۰/۴۳hij	۰/۴۴۵hi	۰/۴۶۲fghi	۱۶/۷۱fg	۱۷/۴۳ef	۱۷/۴۹def
$V_1F_1G_0$	۰/۴۱۷ijk	۰/۴۲۶ijk	۰/۴۶۰ghi	۱۶/۳۳g	۱۶/۴۱fg	۱۶/۵۲fg
$V_1F_0G_1$	۰/۳۵۳lm	۰/۳۸۴klm	۰/۴۰۰jkl	۱۴/۹۳h	۱۵/۷۸gh	۱۵/۹۷gh
$V_1F_1G_1$	۰/۱۸۳o	۰/۲۴۴n	۰/۳۴۴m	۱۳/۸۰i	۱۴/۸۹h	۱۴/۹۲h

مقادیر، میانگین سه تکرار هستند. برای هر صفت، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در گروه‌بندی ارائه‌شده تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند. حروف بین دو صفت قابل مقایسه نیستند. بهره‌وری آب آبیاری با احتساب آب استقرار و شاخص برداشت بر مبنای نسبت عملکرد دانه به عملکرد وزن خشک اندام هوایی شامل دانه محاسبه شدند. K_0، K_1 و K_2 به‌ترتیب مصرف فصلی صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار را نشان می‌دهند. تعریف کدهای آبیاری مطابق جدول ۱ است.

نمایش هم‌زمان عملکرد دانه و بهره‌وری آب، تفاوت توصیفی ترکیب‌های تیماری را از نظر تولید و بهره‌وری نشان می‌دهد (شکل ۳). شکل ۴ نیز تغییرات شاخص برداشت و بهره‌وری آب را در کنار یکدیگر نمایش می‌دهد؛ این دو نمودار جایگزین آزمون‌های مقایسه میانگین نیستند و به‌عنوان آزمون همبستگی یا رگرسیون تفسیر نمی‌شوند.



شکل ۳. نمایش هم‌زمان عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری در ترکیب‌های رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم. هر نقطه میانگین سه تکرار است. دایره آبی، مربع نارنجی و مثلث سبز به‌ترتیب سطوح K_0، K_1 و K_2، معادل صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار طی فصل، را نشان می‌دهند. شماره‌های کنار نقاط، معرف رژیم‌های آبیاری مطابق راهنمای شکل هستند. بهره‌وری آب آبیاری با احتساب آب استقرار محاسبه شده است. شکل توصیفی است و بیانگر آزمون همبستگی یا رگرسیون نیست.



شکل ۴. نمایش هم‌زمان شاخص برداشت و بهره‌وری آب آبیاری در ترکیب‌های رژیم آبیاری و سولفات پتاسیم. هر نقطه میانگین سه تکرار است. دایره آبی، مربع نارنجی و مثلث سبز به‌ترتیب سطوح K_0، K_1 و K_2، معادل صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار طی فصل، را نشان می‌دهند. شماره‌های کنار نقاط، معرف رژیم‌های آبیاری مطابق راهنمای شکل هستند. شکل توصیفی است و بیانگر آزمون همبستگی یا رگرسیون نیست.

تحلیل کنتراستی مراحل حذف آبیاری

برای بررسی مؤلفه‌های مرحله‌ای رژیم آبیاری، هفت درجه آزادی مربوط به این عامل به اثرهای اصلی مراحل رویشی(V) ، گلدهی (F)و پرشدن دانه (G) و برهم‌کنش‌های دوتایی و سه‌تایی آن‌ها تفکیک شد. بر اساس نتایج جدول ۱۱، اثرهای اصلی هر سه مرحله بر عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری معنی‌دار بودند. برای شاخص برداشت، اثرهای اصلی مراحل رویشی و گلدهی معنی‌دار بودند، اما

اثر اصلی مرحله پرشدن دانه معنی‌دار نبود. برای عملکرد دانه، برهم‌کنش V × G در سطح احتمال پنج درصد و برهم‌کنش سه‌گانه V × F × G در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد؛ درحالی‌که برهم‌کنش‌های V × F و F × G معنی‌دار نبودند. در بهره‌وری آب آبیاری، تنها برهم‌کنش سه‌گانه معنی‌دار بود. معنی‌داری این برهم‌کنش برای عملکرد دانه و بهره‌وری آب نشان می‌دهد که پاسخ به حذف آبیاری در هر مرحله باید با توجه به وضعیت آبیاری در سایر مراحل تفسیر شود؛ بنابراین، اثر متوسط یک مرحله به‌تنهایی برای توصیف کامل پاسخ این صفات کافی نیست. در مورد شاخص برداشت، برهم‌کنش V × G در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، اما برهم‌کنش‌های V × F ، F × G و V × F × G معنی‌دار نبودند. بنابراین، برخلاف اثر اصلی مرحله پرشدن دانه، ترکیب وضعیت آبیاری در مراحل رویشی و پرشدن دانه بر شاخص برداشت اثر معنی‌داری داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که تفسیر پاسخ شاخص برداشت نیز باید با توجه به برهم‌کنش مرحله‌ای معنی‌دار انجام شود و نبود معنی‌داری سایر برهم‌کنش‌ها به‌معنای اثبات استقلال فیزیولوژیک مراحل نیست. بزرگ‌ترین آماره F در هر سه صفت به مؤلفه مرحله رویشی اختصاص داشت؛ بااین‌حال، این نتیجه به‌تنهایی مبنای معرفی مرحله رویشی به‌عنوان حساس‌ترین مرحله رشد نیست. زیرا در این مرحله دو نوبت آبیاری و در هر یک از مراحل گلدهی و پرشدن دانه یک نوبت آبیاری حذف شد و مقدار آب حذف‌شده نیز در مراحل مختلف برابر نبود. ازاین‌رو، کنتراست‌ها تفاوت پاسخ به برنامه‌های اجرایی حذف آبیاری را نشان می‌دهند، نه حساسیت ذاتی مراحل در شرایط محدودیت آبی یکسان. مقایسه توصیفی رژیم‌های دارای حجم آب آبیاری نزدیک نیز جایگزین آزمون اثرهای ساده نیست و به‌تنهایی برای رتبه‌بندی حساسیت مراحل کفایت نمی‌کند. کنتراست‌ها با میانگین‌گیری در سطوح سولفات پتاسیم محاسبه شدند؛ بنابراین، نتایج این بخش بیانگر پاسخ مرحله‌ای آبیاری به‌طور متوسط در سطوح مختلف کود هستند و نباید به‌عنوان آزمون تفاوت پاسخ مراحل در هر سطح کود تفسیر شوند. با توجه به معنی‌داری برهم‌کنش آبیاری × سولفات پتاسیم، نتیجه‌گیری درباره پاسخ به مصرف کود بر مقایسه ترکیب‌های تیماری در بخش‌های پیشین استوار است.

در مجموع، ارزیابی مدیریتی رژیم‌های آبیاری مستلزم توجه هم‌زمان به عملکرد دانه و بهره‌وری آب است و کاهش حجم آب آبیاری یا بهبود یک صفت به‌تنهایی نمی‌تواند مبنای توصیه مدیریتی قرار گیرد.

جدول ۱۱. نتایج تحلیل کنتراستی مؤلفه‌های مرحله‌ای حذف آبیاری برای عملکرد دانه، بهره‌وری آب آبیاری و شاخص برداشت

کنتراست	عملکرد دانه: آماره F	مقدار P	بهره‌وری آب: آماره F	مقدار P	شاخص برداشت: آماره F	مقدار P
V	۱۲۴۷/۵۹	<۰/۰۰۰۱	۵۷۱/۸۹	<۰/۰۰۰۱	۱۹۶/۵۷	<۰/۰۰۰۱
F	۱۴۱/۴۳	<۰/۰۰۰۱	۴۷/۷۵	<۰/۰۰۰۱	۱۵/۱۳	۰/۰۰۱۶
G	۳۵۱/۸۸	<۰/۰۰۰۱	۲۲۱/۱۰	<۰/۰۰۰۱	۰/۷۶	۰/۳۹۷۶
V×F	۰/۸۹	۰/۳۶۲۴	۲/۲۰	۰/۱۶۰۱	۰/۳۵	۰/۵۶۳۵
V×G	۵/۹۷	۰/۰۲۸۴	۱/۱۰	۰/۳۱۱۹	۹/۳۰	۰/۰۰۸۶
F×G	۰/۰۳	۰/۸۵۶۲	۳/۴۰	۰/۰۸۶۳	۴/۴۹	۰/۰۵۲۴
V×F×G	۱۶/۶۵	۰/۰۰۱۱	۲۷/۵۲	۰/۰۰۰۱	۱/۳۵	۰/۲۶۳۹

درجه آزادی صورت و مخرج تمام آزمون‌ها به‌ترتیب ۱ و ۱۴ است. V، F و G به‌ترتیب مؤلفه‌های وضعیت آبیاری در مراحل رویشی، گلدهی و پرشدن دانه هستند. تعداد نوبت‌ها و حجم آب حذف‌شده میان مراحل برابر نبودند. کنتراست‌ها با میانگین‌گیری در سطوح سولفات پتاسیم و با استفاده از خطای کرت اصلی آزمون شدند. بهره‌وری آب آبیاری با احتساب آب استقرار و شاخص برداشت بر مبنای نسبت عملکرد دانه به عملکرد وزن خشک کل اندام‌های هوایی، شامل دانه، محاسبه شدند.

نتیجه‌گیری

پاسخ کینوا رقم تیتیکاکا در شرایط کاشمر به ترکیب مراحل حذف آبیاری و سطح مصرف سولفات پتاسیم وابسته بود. در رژیم V1F1G1 ، کاهش ۴۲/۷۴ درصدی آب آبیاری نسبت به شاهد با کاهش ۷۷/۳۱ درصدی عملکرد دانه و ۷۰/۲۸ درصدی ماده خشک همراه شد و

بهره‌وری آب آبیاری از ۰/۶۴۹ به ۰/۲۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب رسید؛ بنابراین، کاهش آب در این رژیم به بهبود بهره‌وری منجر نشد. معنی‌داری برهم‌کنش سه‌گانه مراحل برای عملکرد دانه و بهره‌وری آب نیز نشان داد که پاسخ به حذف آبیاری باید در چارچوب برنامه کامل آبیاری تفسیر شود؛ بااین‌حال، نابرابری تعداد نوبت‌ها و مقدار آب حذف‌شده، تعیین قطعی حساس‌ترین مرحله را محدود کرد. در V1F1G1، افزایش مصرف سولفات پتاسیم از صفر به ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه را از ۰/۳۹۸ به ۰/۷۴۷ تن در هکتار افزایش داد، اما افت تولید نسبت به شاهد را جبران نکرد. ازاین‌رو، نتایج از توصیه یکسان بالاترین سطح کود برای همه رژیم‌ها پشتیبانی نمی‌کنند. تعمیم یافته‌ها، با توجه به اجرای آزمایش در یک فصل، یک مکان و یک رقم، به ارزیابی چندساله و بررسی اقتصادی نیاز دارد.

منابع

بهادری، محمدرضا؛ رزاقی، فاطمه و سپاسخواه، علیرضا. (۱۴۰۱). اثر کاربرد تنش آبی در مراحل مختلف رشد گیاه کینوا بر رشد و عملکرد کینوا در شرایط مزرعه‌ای. *علوم آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۳۱۷–۳۲۸. DOI: 10.47176/jwss.26.3.44111 .

گلستانی‌فر، فرزانه؛ خاشعی سیوکی، عباس و محمودی، سهراب. (۱۴۰۱). تعیین ضریب گیاهی و نیاز آبی گیاه کینوا به روش لایسیمتری در دشت بیرجند. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۶(۴)، ۴۰۵–۴۲۰. DOI: 10.22092/jwra.2023.360244.950 .

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Bahadori, M. R., Razzaghi, F., & Sepaskhah, A. R. (2022). Effect of water stress at different growth stages on growth and yield of quinoa under field conditions. *Journal of Water and Soil Science, 26*(3), 317–328. DOI: 10.47176/jwss.26.3.44111 (In Persian).

Golestanifar, F., Khashei, A., & Mahmoodi, S. (2023). Determination of crop coefficient and water requirement for quinoa by lysimetric method in Birjand Plain. *Journal of Water Research in Agriculture, 36*(4), 405–420. DOI: 10.22092/jwra.2023.360244.950 (In Persian).

Li, X., Shen, Z., A, Y., Zhao, Y., Yang, B., Feng, Y., Bian, Q., & Fu, Y. (2025). Optimizing water–nitrogen coupling for quinoa yield, quality, and resource use efficiency in arid regions. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1654704. DOI: 10.3389/fpls.2025.1654704.

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. DOI: 10.1186/s12870-024-05523-5.

Pathan, S., Ndunguru, G., Clark, K., & Ayele, A. G. (2023). Yield and nutritional responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes to irrigated, rainfed, and drought-stress environments. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 7*, 1242187. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1242187.

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*(3), 390–404. DOI: 10.1111/jac.12392.

Taaime, N., El Mejahed, K., Choukr-Allah, R., Bouabid, R., Oukarroum, A., & El Gharous, M. (2023). Optimization of macronutrients for improved grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) crop under semi-arid conditions of Morocco. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1146658. DOI: 10.3389/fpls.2023.1146658.

Tetarwal, J. P., Bijarnia, A., Yadav, R. K., Kumar, R., Choudhary, M., Singh, D., & Kumar, R. (2025). Interactive effect of land configuration and irrigation on quinoa yield and water use efficiency in North-West India. *Archives of Agronomy and Soil Science*. DOI: 10.1080/03650340.2025.2491745.

Turcios, A. E., Papenbrock, J., & Tränkner, M. (2021). Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science, 207*(4), 618–630. DOI: 10.1111/jac.12477.