



The Effect of Kaolin and Fulvic Acid Antitranspirant Compounds on Some Traits of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under Drought Stress Conditions

Adel Mafakheri¹ , Adel Siosemardeh¹ ✉, Isa Maroufpoor² & Farzad Hosseinpanahi¹

¹ Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Iran.

² Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

✉ Corresponding author. E-mail: a33@uok.ac.ir

ABSTRACT

Introduction: Climate change and its impact on crop productivity have become one of the most significant environmental challenges. Drought, as an abiotic stress factor, can substantially disrupt plant molecular, biochemical, and physiological processes, affecting growth and yield. In today's world, the use of antitranspirant substances to reduce the negative effects of various environmental stresses has been proposed. This experiment was designed with the aim of investigating the effects of drought stress on quinoa growth and yield, as well as the impact of antitranspirant foliar application during the growth and development period. These methods were employed to reduce the effects of drought stress.

Materials and methods: This study was conducted in two separate field and pot experiments at the research farm of Kurdistan University over two years (2021 and 2022) with spring planting (in June). The experiment was designed as a split-plot based on a randomized complete block design with three replications. The investigated factors included four levels of drought stress: 1) full irrigation throughout the growth period, 2) 50% water deficit during the vegetative stage (vegetative stress), 3) 50% water deficit during the reproductive stage (reproductive stress), and 4) 50% water deficit throughout the entire growth period (full stress) as the main factor. The foliar application treatments included: 1) control (water spray), 2) 5% kaolin, 3) 2.5% kaolin, and 4) 5 g/L fulvic acid as the sub-factor. The traits of plant height, biological yield, thousand-grain weight, grain yield, harvest index, water use efficiency, root length, and root dry weight were measured.

Results: Drought stress resulted in a reduction in all growth and performance traits, indicating limitations in physiological capacity and disruption of the source-sink balance. Under stress conditions, both fulvic acid and kaolin modulated responses, but they acted through different pathways; fulvic acid improved water use efficiency by stimulating growth and maintaining tissue hydration, while kaolin provided the highest root dry weight (2.28 grams) and biological yield by reducing surface evaporation and preserving structural stability. The relationship between root dry weight and grain yield showed that maintaining root structure plays a crucial role in sustaining production under drought conditions. Ultimately, the results suggest that quinoa's response to stress is depended on the regulatory mechanisms of the treatments, with fulvic acid enhancing physiological adaptability and kaolin strengthening structural stability, both contributing to improved productivity and drought tolerance.

Conclusion: The combined findings indicate that the targeted use of these two antitranspirant compounds can harmonize the plant's physiological and structural mechanisms against drought stress, leading to yield stability under water-deficit conditions.

Keywords: Grain yield, Root length, Water use efficiency, Root dry weight, Harvest index.

Article Type: Research Article

Article history: Received: 02 Oct 2025, Revised: 21 Nov 2025, Accepted: 27 Nov 2025, Published online: 25 Dec 2025

Cite this article: Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Maroufpoor, I. & Hosseinpanahi, F. (2025). The Effect of Kaolin and Fulvic Acid Antitranspirant Compounds on Some Traits of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under Drought Stress Conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 4(4), 520-547. DOI: [10.22126/cbb.2026.13548.1133](https://doi.org/10.22126/cbb.2026.13548.1133)





اثر ترکیبات ضد تعرق کائولین و فولویک اسید بر برخی صفات کینوا (Chenopodium Quinoa Willd) در شرایط تنش خشکی

عادل مفاخری^۱، عادل سی‌وسه‌مرده^۱✉، عیسی معروف‌پور^۲ و فرزاد حسین‌پناهی^۱

^۱ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

^۲ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

✉ نویسنده مسئول. رایانامه: a33@uok.ac.ir

چکیده

مقدمه: تغییرات اقلیمی و پیامد آن بر عملکرد محصولات زراعی، به یکی از چالش‌های مهم زیست محیطی تبدیل شد است. خشکسالی، به‌عنوان یک تنش غیرزیستی، با ایجاد اختلال در فرآیندهای کلیدی مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی، بطور قابل توجهی پتانسیل عملکرد و رشد گیاه را تضعیف می‌کند. در دنیای امروز استفاده از ترکیبات آنتی‌تعرق (ضد تعرق) به‌عنوان راهکاری برای کاهش اثرات سوء ناشی از تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات تنش خشکی بر رشد و عملکرد گیاه کینوا و همچنین محلول‌پاشی مواد آنتی‌تعرق در مراحل مختلف رشد جهت کاهش اثرات تنش طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها: این مطالعه در قالب دو آزمایش جداگانه به‌صورت مزرعه‌ای و گلخانه‌ای در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان در دو سال (۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) به صورت کشت بهاره (در خرداد ماه) انجام شد. این آزمایش به صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار پیاده شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل چهار سطح تنش خشکی شامل (۱) آبیاری کامل گیاه در طول دوره رشد، (۲) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در مرحله رویش گیاه (تنش رویشی)، (۳) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در مرحله زایشی گیاه (تنش زایشی) و (۴) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در کل دوره رشد گیاه (تنش کامل) به عنوان فاکتور اصلی و تیمارهای محلول‌پاشی مواد ضدتعرق شامل (۱) شاهد (محلول‌پاشی با آب)، (۲) کائولین ۵ درصد، (۳) کائولین ۲/۵ درصد و (۴) اسید فولویک ۵ گرم در لیتر به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. صفات ارتفاع، عملکرد بیولوژیک، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، شاخص برداشت، کارایی مصرف آب، طول ریشه و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: تنش خشکی باعث کاهش در تمامی صفات عملکردی و رشد ریشه شد که بیانگر محدودیت در ظرفیت فیزیولوژیک و اختلال در تعادل منبع و مخزن بود. در شرایط تنش، فولویک اسید و کائولین هر دو سبب تعدیل پاسخ‌ها شدند اما از مسیرهای متفاوتی عمل کردند؛ فولویک اسید با تحریک رشد و حفظ وضعیت آبی بافت‌ها، موجب بهبود کارایی مصرف آب شد، در حالی که کائولین با کاهش تبخیر سطحی و حفظ پایداری ساختاری، بیشترین وزن خشک ریشه (۲/۲۸ گرم) و عملکرد بیولوژیک را فراهم کرد. ارتباط بین وزن خشک ریشه و عملکرد دانه نشان داد که حفظ ساختار ریشه نقش کلیدی در تداوم تولید تحت شرایط خشکی دارد. در نهایت، نتایج حاکی از آن است که پاسخ کینوا به تنش به سازوکارهای تنظیمی تیمارها وابسته است؛ به‌طوری که فولویک اسید با ارتقای سازگاری فیزیولوژیک و کائولین با تقویت پایداری ساختاری، به بهبود بهره‌وری و تحمل خشکی کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری: ترکیب یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده هدفمند از این دو ترکیب آنتی‌تعرق می‌تواند مکانیسم‌های فیزیولوژیک و ساختاری گیاه را در برابر تنش خشکی هماهنگ کرده و به پایداری عملکرد در شرایط کم‌آبی منجر شود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد دانه، طول ریشه، کارایی مصرف آب، وزن خشک ریشه، شاخص برداشت.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

نوع مقاله: دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶ انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴

استناد: مفاخری، ع.، سی‌وسه‌مرده، ع.، معروف‌پور، ع. و حسین‌پناهی، ف. (۱۴۰۴). اثر ترکیبات ضد تعرق کائولین و فولویک اسید بر برخی صفات کینوا

(Chenopodium Quinoa Willd) در شرایط تنش خشکی. بیوتکنولوژی و بیوشیمی غلات، ۴(۴)، ۵۲۰-۵۴۷. DOI:

[10.22126/cbb.2026.13548.1133](https://doi.org/10.22126/cbb.2026.13548.1133)



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

محیطی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار باشد (Buko, 2011). خشکسالی، به عنوان یک عامل تنش غیرزیستی، می‌تواند با مختل کردن فرآیندهای کلیدی مولکولی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی مانند متابولیسم پروتئین، فتوسنتز و بیوسنتز لیپید، عملکرد و رشد گیاه را به طور قابل توجهی مختل کند (Farouk *et al.*, 2023). یافته‌های Hossain و همکاران (2020) نشان داد که در مقایسه با گیاهان تحت شرایط شاهد، کاهشی در ویژگی‌های رشد و عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی مشاهده شد. این کاهش ممکن است به افزایش تبخیر و تعرق، کاهش فتوسنتز، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش جذب دی‌اکسیدکربن، کاهش آماس سلولی و مهار تقسیم سلولی در شرایط خشکسالی نسبت داده شود. با توجه به اینکه بخش زیادی از مساحت کشور ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، بنابراین کاشت گیاهان متحمل به تنش خشکی مانند کینوا، بهترین راهکار برای جلوگیری از کاهش عملکرد گیاهان زراعی است (Vega-Galvez *et al.*, 2010). تنش خشکی به طور متوسط بیش از ۵۰ درصد عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد (Zlatev and Lidon, 2012). با توجه به محدودیت منابع آبی کشور، صرفه‌جویی در مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، امری اجتناب‌ناپذیر و یکی از روش‌هایی است که امروزه برای افزایش بهره‌وری از آب توسط کارشناسان پیشنهاد می‌شود. تنش جزئی یا کم‌آبایی هر چند کاهش تولید در واحد سطح را در به دنبال دارد، اما در این روش، تنش خشکی در یک یا چند مرحله خاص

کینوا گیاهی با نام علمی *Chenopodium Quinoa* Willd. از خانواده تاج خروسیان (Wilson and Heiser., 1979) و زیر خانواده اسفناجیان می‌باشد (Contreras-Jiménez *et al.*, 2019). گیاهی است یکساله که برگ‌های پهن و متناوب آن بر روی ساقه مستقیم قرار دارد. دارای رنگ‌های متنوع گل آذین که این تنوع در رنگ، ناشی از حضور بتاسیانین است (Rathore and Kumar., 2021). این گیاه بومی مناطق آند، بولیوی، پرو و شیلی است و کشت و کار آن بیش از ۵۰۰۰ سال قدمت دارد (FAO, 2011). این گیاه به دلیل دارا بودن ترکیبات غذایی مناسب و متعادل، به‌عنوان یک غذای کامل شناخته شده است. تحمل بالای کینوا در برابر شرایط نامساعد محیطی، آن را به‌عنوان یک محصول مهم و اساسی برای تأمین امنیت غذایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی، تبدیل کرده است. کینوا دارای میزان بالای پروتئین، لیپید، ویتامین و خاکستر است که باعث شده ارزش غذایی آن از حبوبات بیشتر و بهتر باشد (Mokari *et al.*, 2020). کینوا قابلیت رشد خوبی در خاک‌های فقیر دارد و مقاومت زیادی در برابر اکثر تنش‌ها غیر زنده (Jacobsen *et al.*, 2003) و عوامل نامطلوب غالب مانند خشکی، سرما، بیماری‌ها و آفات از خود نشان می‌دهد (Kianinezhad and Safarzadeh Vishekaei, 2022). تغییرات اقلیمی و اهمیت تأثیر آن بر عملکرد گیاهان زراعی، سبب شده که به یکی از چالش‌های مهم زیست محیطی تبدیل شود و مطالعه روی تنش‌های

رطوبتی به کار می‌روند (Moradi-Ghahderijani *et al.*, 2017). اسید فولویک (*Fulvic acid*) یک ماده پودری قرمز مایل به قهوه‌ای است که به راحتی در آب حل می‌شود و حاوی گروه‌های کربوکسیل، گروه‌های هیدروکسیل فنلی، گروه‌های هیدروکسیل الکل و سایر گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن است که متعلق به پلیمرهای آلی طبیعی با وزن مولکولی کم هستند و به راحتی توسط گیاه جذب و مورد استفاده قرار می‌گیرند (Gong *et al.*, 2020). اثرات فیزیولوژیکی فولویک اسید بر گیاهان، همانند اثرات اکسین و ضدتعرق‌ها می‌باشد (Canellas *et al.*, 2015). این اثرات مثبت، در تنش خشکی ویژه و نمایان است (Weerasinghe *et al.*, 2016). مطالعات متعددی تأیید کرده‌اند که فولویک اسید می‌تواند به طور مؤثر سازگاری گیاه را با تنش‌های غیرزیستی افزایش دهد. به طور خاص، اسید فولویک فعالیت‌های آنزیم کاتالاز و پراکسیداز را برای کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان فعال می‌کند (Yu *et al.*, 2024; Hareem *et al.*, 2024). اسید فولویک، به عنوان یک آنتی تعرق و همچنین تنظیم‌کننده رشد گیاه، در تنظیم فرآیندهای بیولوژیکی متعدد مانند افزایش رشد (Liang *et al.*, 2024)، افزایش ظرفیت فتوسنتزی (Chen *et al.*, 2022) و تنظیم و کاهش آسیب اکسیداتیو (Zhu *et al.*, 2024) نقش دارد.

کائولین یکی از ترکیبات طبیعی قابل استفاده برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی و گرمایی به دلیل قابلیت انعکاس نور خورشید و کاهش دمای برگ در برخی از

رشدی اعمال می‌شود، یا کم آبیاری ایستا در تمام مراحل رشد گیاه برقرار می‌گردد (Mokari *et al.*, 2020). بطور میانگین ۹۵ تا ۹۸ درصد آب جذب شده توسط گیاه، از طریق تعرق از گیاه خارج می‌شود. بنابراین اگر راهی عملی برای کاهش این مقدار تعرق پیدا شود، میزان مصرف آب به‌ویژه در مناطق خشک تا حد زیادی کاهش خواهد یافت. بدین ترتیب، با کاهش تعداد دفعات آبیاری از طریق کاهش سرعت مصرف آب از خاک، با مصرف یک ماده ضدتعرق می‌توان از طریق کاهش سرعت تخلیه آب از خاک، فواصل آبیاری را بیش‌تر نمود و بازده آبیاری را بالا برد و تا حدودی کاهش تولید محصول ناشی از کمبود آب را جبران نمود.

استفاده از مواد ضدتعرق، راهکار امیدوارکننده‌ای برای تنظیم تعرق و حفظ آب گیاه در حد مطلوب به‌شمار می‌رود (Goreta *et al.*, 2007). امروزه استفاده از مواد ضدتعرق به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تنش‌های مختلف محیطی مطرح شده است. مواد ضدتعرق می‌توانند در کنار افزایش مقاومت به تنش‌ها، سرعت رشد و عملکرد گیاه را نیز بهبود دهند. بنابراین می‌توان اظهار نمود که استفاده صحیح از این گروه مواد می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریتی بسیار حیاتی در بالا بردن توان تحمل تنش‌های مختلف در گیاهان زراعی مطرح شود (Azooz and Ahmad, 2015). از اهداف اساسی و مهم کاربرد مواد ضدتعرق، افزایش رشد گیاه از طریق بهبود پتانسیل آب آن است. ضدتعرق‌ها، ترکیباتی شیمیایی هستند که برای تنظیم تعرق در گیاهان و حفظ وضعیت مناسب

گیاهان زراعی است. کائولین دارای وزن مولکولی بسیار کم با قطر ذرات دو میکرومتر بوده و به صورتی فرموله شده است که قدرت پراکندگی بالایی داشته و می‌تواند لایه یکنواختی روی سطح برگ و ساقه ایجاد نماید. لایه ایجاد شده بوسیله کائولین منفذدار بوده، در تبادل گازی برگ مشکل و اختلال به وجود نمی‌آورد، طیف فعال فتوسنتزی را از خود عبور داده، اما تا حدودی مانع از عبور اشعه‌های ماوراء بنفش می‌شود. کائولین معدنی ظاهری سفید رنگ و خاصیت آبدوست دارد (Saour., 2005). سوسپانسیون این ماده، آب بوده که پس از محلول‌پاشی، آب تبخیر و کائولین سفید با تخلخل زیاد به‌عنوان لایه محافظ روی سطح برگ‌ها باقی می‌ماند (Saour, 2005). بر اساس نتایج حاصل از تحقیق Nazim و همکاران (2021)، کاربرد کائولین باعث بهبود ویژگی‌های رشدی از جمله ارتفاع گیاه، قطر گیاه، طول و عرض برگ و وزن تر و خشک در شرایط تنش خشکی شد. در شرایط خشکی، محلول‌پاشی برگ با کائولین با افزایش آماس گیاه، محتوای نسبی آب، پتانسیل آب و بهره‌وری مصرف آب را افزایش می‌دهد. همچنین بیان شد که با محافظت از سطح برگ، کائولین سبب بهبود میزان فتوسنتز، تعرق و همچنین محتوای کلروفیل و در نهایت باعث افزایش عملکرد و زیست توده می‌شود. یافته‌های یک پژوهش نشان داد که بالاترین عملکرد در پارامترهای رشدی گیاه، تحت شرایط بدون تنش (بهینه)، با محلول‌پاشی کائولین حاصل شد. نکته قابل توجه این است که کائولین همچنین فرآیند بازیابی سریع‌تر عملکردهای فیزیولوژیکی

را در طول دوره پساتنش تسهیل نمود. به طور خلاصه، محلول‌پاشی کائولین از طریق تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متمایز، توانست اثرات منفی تنش آبی را بر عملکرد کلی گیاه کاهش دهد. این نتایج مؤید آن است که محلول‌پاشی کائولین می‌تواند راهکاری عملی برای حمایت از کشت و تولید گیاهان در زمین‌های حاشیه‌ای، کم‌بازده و خشک باشد (Faghihi et al., 2025).

به دلیل کاربردهای مختلف گیاه کینوا و توقع کم آن، این گیاه به ویژه در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرارگرفته است. کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در اقلیم خشک، از یک طرف نیازمند تولید محصولات با نیاز آبی کم و با کیفیت غذایی بهتر بوده و از سوی دیگر درگیر مسائل و مشکلات تغییر اقلیم است. به نظر می‌رسد که بررسی محلول‌پاشی ضدتعرق‌ها در شرایط تنش خشکی در گیاه کینوا بتواند در راستای نیل به اهداف توسعه پایدار و افزایش مقاومت به تنش خشکی و افزایش عملکرد و تولید محصول با کیفیت بهتر و خصوصیات مطلوب زراعی مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در قالب دو آزمایش جداگانه به‌صورت مزرعه‌ای و گلدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان در دو سال (۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) به صورت کشت بهاره (در خرداد ماه) انجام شد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شهرستان دهگلان با طول جغرافیایی ۴۷ درجه و

۱۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و ۱۸۶۶ متر از سطح دریا می‌باشد. شهرستان دهگلان از نظر اقلیمی به عنوان اقلیم مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. زمین آزمایش در بهار بعد از مساعد شدن هوا با گاوآهن شخم زده شد. سپس برای تسطیح و خرد شدن کلوخه‌ها از روتیواتور استفاده شد. کودهای شیمیایی فسفره، پتاسه و کود نیتروژن مورد نیاز بر اساس آزمون خاک مصرف گردید (جدول ۱).

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مزرعه و گلدان مورد استفاده

Table 1. Physicochemical properties of the soil's field and used pots

فسفر P	پتاسیم K	نیتروژن N	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (ES)	کربن آلی OC	بافت خاک	رس clay	سیلت silt	شن sand
ppm	ppm	%	dS.m ⁻¹		%		%	%	%
۱۱/۵	۳۱۸	۰/۰۹	۷/۵۳	۰/۴۹	۰/۸۷	رسی	۴۲	۱۸/۳	۳۹/۷

در هر کرت شش خط با فاصله ۳۵ سانتی‌متر کشت شد. فاصله بین کرت‌های فرعی و اصلی به ترتیب برابر با ۱ متر و ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. سیستم آبیاری مورد استفاده در این آزمایش از نوع آبیاری قطره‌ای -نواری بود. آبیاری تمامی کرت‌ها تا سبز شدن کامل بذرها یکسان بود. بعد از سبز شدن، آبیاری کرت‌های تحت تیمار تنش خشکی به صورت ۵۰ درصد نیاز آبی و بر اساس مراحل رشد روش پنمن -مانتیث، (روشی که تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از داده‌های هواشناسی برآورد گردید). در این پژوهش، مقدار آب آبیاری توسط یک کنتور حجمی تعبیه شده روی لوله اصلی اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای کنترل و تنظیم مقدار آب آبیاری ورودی به هر کرت، شیرهای قطع و وصل در ابتدای لوله قطره‌ای نصب شد. جهت محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع روش‌های متعددی ارائه شده است. از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) و سازمان

این آزمایش به صورت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار پیاده شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل چهار سطح تنش خشکی شامل (۱) آبیاری کامل و مورد نیاز گیاه در طول دوره رشد، (۲) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در مرحله رویشی گیاه (تنش رویشی)، (۳) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در مرحله زایشی گیاه (تنش زایشی) و (۴) اعمال کم آبیاری به میزان ۵۰ درصد در کل دوره رشد گیاه (تنش کامل) به عنوان فاکتور اصلی و تیمارهای محلول‌پاشی مواد ضدتعرق شامل (۱) شاهد (محلول‌پاشی با آب)، (۲) کائولین ۵ درصد، (۳) کائولین ۲/۵ درصد و (۴) اسید فولویک ۵ گرم در لیتر به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد محلول‌پاشی مرحله زایشی (ده روز بعد گلدهی کامل) با سمپاش پستی شارژی انجام شد. بذر کینوا رقم زودرس تی‌تی‌کاکا (Titicaca) به میزان ۱۲ کیلوگرم در هکتار کشت شد. ابعاد هر کرت به صورت ۵ × ۲/۱ متر و

خواربار جهانی (FAO) روش پنمن -مانتیث - فائو (Penman-Monteith FAO) به عنوان روش استاندارد برای محاسبه آن معرفی گردیده است (Allen et al., 1998). Chen و همکاران (۲۰۰۵) آزمایشی در کشور تایوان به منظور تعیین بهترین روش برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل انجام دادند که بر اساس نتایج حاصل، روش پنمن مانتیت برآورد دقیق تری نسبت به روش های دیگر ارائه می دهد. به منظور تعیین میزان نیاز آبی گیاه کینوا، متوسط ضرایب گیاهی کینوا در طول دو سال انجام آزمایش و دوره های ابتدایی رشد، توسعه، میانی و انتهایی به ترتیب، ۰/۰۶، ۰/۰۹، ۱/۲ و ۰/۷۵ در نظر گرفته شد (Talebnejad and Sepaskhah, 2015).

مبارزه با علف های هرز در طول فصل رشد در مواقع لازم به صورت وجین دستی انجام شد. برداشت اواخر شهریور ماه صورت گرفت. صفات بررسی شده شامل ارتفاع بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، کارایی مصرف آب، وزن هزاردانه و شاخص برداشت بود. در زمان برداشت، پس از حذف اثرات حاشیه، یک مترمربع از هر کرت برداشت و صفات عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک اندازه گیری و شاخص برداشت محاسبه شد. در این آزمایش همزمان با برداشت کینوا ارتفاع نهایی بوته از طوقه تا انتهای گل بر حسب سانتی متر برای سه بوته اندازه گیری شد، سپس میانگین آن ها ثبت گردید. شاخص کارایی مصرف آب نسبت میزان ماده خشک تولید شده به میزان آب مصرف شده در آبیاری است و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه شد (Xu et al., 2016):

WUE_i : کارایی مصرف آب در تیمار i ام بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

$$WUE_i = \frac{DM_i}{I_i}$$

DM_i : میزان ماده خشک تولید شده در تیمار i بر حسب کیلوگرم در هکتار

I_i : مقدار کل آبیاری در فصل رشد بر حسب متر مکعب
برای اندازه گیری صفات ریشه، از گلدان هایی به ارتفاع و قطر ۵۰ سانتی متر و در مجموع ۴۸ گلدان استفاده شد. آماده سازی گلدان ها در خرداد ماه صورت گرفت. در هر گلدان تعداد ۱۰ عدد بذر در عمق یک سانتی متری خاک کاشته شد و گلدان ها در شرایط باز محیطی قرار داده شدند. پس از سبز شدن، بوته ها تنک شدند و در نهایت درون هر گلدان پنج بوته نگهداری شد. برای اندازه گیری طول ریشه اصلی در پایان فصل رشد، بعد از خارج شدن ریشه از خاک و تمیز شدن آن، از ابتدا تا انتهای ریشه با دقت یک میلی متر اندازه گیری به عمل آمد. برای محاسبه وزن خشک ریشه، ریشه ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد در آون قرار داده و سپس توسط ترازوی دقیق توزین شدند. تجزیه و تحلیل داده ها به کمک نرم افزار آماری SAS و مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن انجام گرفت. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع گیاه

کم‌تری بر ارتفاع گیاه خواهد گذاشت (Farooq *et al.*, 2010). تنش خشکی می‌تواند عملکرد مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، جذب مواد غذایی از طریق ریشه، به دلیل کاهش حجم آب خاک و همچنین کاهش توزیع مواد غذایی در بافت خاک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انتقال مواد غذایی از ریشه‌ها به بخش هوایی نیز کم می‌شود که همین امر کاهش ارتفاع گیاه را به همراه دارد (Haghaninia *et al.*, 2024; Fischer *et al.*, 2017).

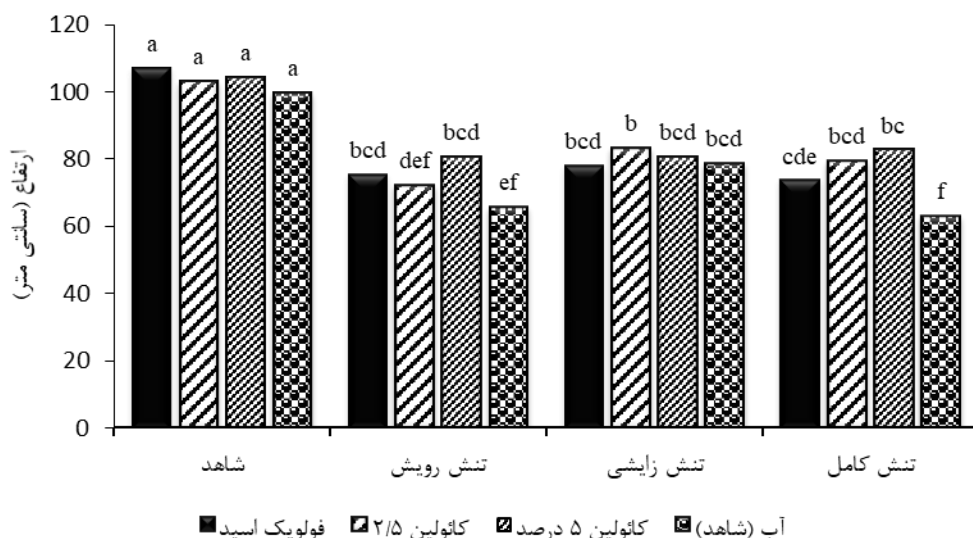
افزایش ارتفاع گیاه با کاربرد مواد ضد تعرق می‌تواند به دلیل کاهش تعرق و حفظ آب در گیاه باشد. کائولین با ایجاد یک لایه محافظ روی سطح برگ، از تبخیر آب جلوگیری می‌کند و فولویک اسید با بهبود جذب آب و مواد غذایی، به گیاه کمک می‌کند تا در شرایط تنش بهتر عمل کند. مکانیسم عمل فولویک اسید ممکن است به دلیل وزن مولکولی کم آن باشد که می‌تواند به غشای سلولی نفوذ کرده و با کاتیون‌ها کمپلکس تشکیل دهد تا جذب مواد مغذی را افزایش دهد (Lalas *et al.*, 2018).

در تحقیق دیگری نتایج نشان داد که استفاده از آنتی‌تعرق‌هایی مانند کائولین در کاهش پیامدهای تنش خشکی مؤثر است، به‌طوری‌که سازوکار عمل کائولین از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی، منتج به ارتقاء معنی‌دار رشد و افزایش شاخص‌های مرتبط با عملکرد گیاه در طول دوره‌های مختلف آبیاری گردید (Ghanbari *et al.*, 2021). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تنش خشکی می‌تواند تأثیر منفی بر ارتفاع گیاه کینوا داشته

بر اساس نتایج تجزیه واریانس مرکب، اثرات سطوح مختلف فاکتور تنش خشکی، سطوح مختلف فاکتور آنتی‌تعرق و همین‌طور برهم‌کنش این دو فاکتور بر ارتفاع بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

با این حال، اثر سه‌گانه (تنش خشکی $\times$ آنتی‌تعرق $\times$ سال) بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). کم‌ترین ارتفاع مشاهده شده، مربوط به تیمار محلول‌پاشی آب (شاهد) در شرایط تنش کامل با $63/3$ سانتی‌متر بود (شکل ۱). این مقدار از نظر آماری، فاقد اختلاف معنی‌دار با گیاهان تحت تنش رویشی با محلول‌پاشی آب ($65/8$ سانتی‌متر) و کائولین $2/5$ درصد ($72/3$) بود. کاهش ارتفاع در مرحله رویشی ($65/8$ سانتی‌متر) نسبت به مرحله زایشی ($78/8$ سانتی‌متر) در تیمار شاهد، نشان می‌دهد که بروز تنش خشکی در مراحل اولیه، تأثیر بیش‌تری بر پتانسیل نهایی ارتفاع گیاه دارد. نتایج مقایسه میانگین‌ها حاکی از اثر مثبت محلول‌پاشی کائولین و فولویک اسید در افزایش ارتفاع بوته در مقایسه با تیمار شاهد (محلول‌پاشی با آب) در دو سطح تنش رویشی و زایشی است. این امر نشان‌دهنده موفقیت این ترکیبات در کاهش تنش آبی است. بالاترین میانگین ارتفاع تحت شرایط تنش کامل، در تیمار کائولین $5/$ با $30/85$ درصد افزایش نسبت به شاهد مشاهده شد. این امر نشان می‌دهد که غلظت 5% کائولین بیش‌ترین کارایی را در مدیریت تنش‌های محیطی داشته است (شکل ۱). تنش خشکی از طریق کاهش سرعت رشد گیاه، بر ارتفاع گیاه تأثیر می‌گذارد و هرچه زمان اعمال تنش به مراحل انتهایی فصل رشد نزدیک‌تر باشد تأثیر

باشد، اما کاربرد مواد ضدتعرق مانند کائولین و فولویک اسید می‌تواند این اثرات را کاهش دهد و به بهبود رشد گیاه در شرایط تنش کمک کند.



شکل ۱- مقایسه میانگین صفت ارتفاع بوته کینوا در مراحل مختلف اعمال تنش خشکی تحت شرایط محلول‌پاشی با آنتی‌تعرق‌ها. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با هم ندارند.

Figure 1. Interaction effects: comparison of the mean plant height of quinoa at different stages of drought stress under foliar application of anti-transpirant treatments. Columns sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

عملکرد بیولوژیک

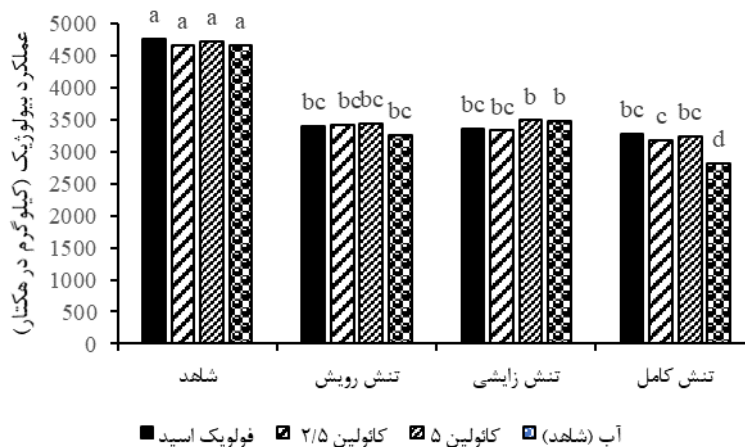
بیولوژیک نیز کاهش مشابه تنش رویشی نشان داد. کم-

ترین وزن ماده خشک نیز به تیمار تنش کامل خشکی و بدون کاربرد آنتی‌تعرق‌ها (شاهد) تعلق داشت که معادل ۴۱ درصد کاهش نسبت به بهترین تیمار (شاهد محلول‌پاشی با فولویک اسید) بود. این کاهش شدید در تنش کامل، تأکیدی بر این حقیقت است که تنش طولانی‌مدت و فراگیر، بیشترین اختلال را در فرآیندهای حیاتی (جذب مواد، فتوسنتز و رشد سلولی) ایجاد کرده و فرصت جبران را از گیاه سلب می‌کند. مهم‌ترین یافته این بخش، اثربخشی چشم‌گیر تیمارهای ضدتعرق در تعدیل اثرات منفی تنش و حفظ زیست‌توده تولیدی است. این

تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد عملکرد بیولوژیک کینوا تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف تنش خشکی، تیمارهای آنتی‌تعرق و اثر متقابل این دو فاکتور واقع شد. بالاترین وزن ماده خشک در شرایط بدون تنش (شاهد) و با کاربرد آنتی‌تعرق‌ها مشاهده شد که متعلق به تیمار فولویک اسید با ۴۷۵۶ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۲). تنش رویشی در کل تیمارهای محلول‌پاشی منجر به کاهش عملکرد بین ۲۵ درصد تا ۳۰ درصد نسبت به شرایط بدون تنش (شاهد) شد. اثر تنش زایشی بر عملکرد

را در شرایط محدودیت آب حفظ کرده و به تولید ماده خشک بیش‌تر کمک نموده است، همان‌طور که در استناد به (Jayme-Oliveira *et al.*, 2017; Fischer *et al.*, 2017) نتایج به‌صراحت نشان می‌دهند که عملکرد بیولوژیک کینوا بسیار حساس به زمان و شدت اعمال تنش خشکی است. با این حال، استفاده از ترکیبات ضد تعرق، به‌ویژه کائولین با دوز بالاتر، یک راهبرد مدیریتی مؤثر محسوب می‌شود که با تنظیم دقیق تعادل آب و انرژی گیاه، به حفظ قابل توجه تولید زیست‌توده در شرایط نامساعد محیطی کمک می‌کند و پتانسیل کینوا برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک را تقویت می‌نماید.

ترکیبات توانستند در شرایط تنش، میانگین عملکرد بیولوژیک را به‌طور معنی‌داری در تیمار تنش کامل به سطوح بالاتر ارتقا دهند. بطوری که فولویک اسید عملکرد را در شرایط تنش کامل ۱۸ درصد نسبت به تیمار شاهد آب در همان سطح تنش، افزایش داد. کائولین ۵٪ عملکرد را تقریباً ۱۶ درصد نسبت به تیمار شاهد در تنش کامل، افزایش داد (شکل ۲). این تأثیر عمدتاً ناشی از خاصیت انعکاسی پوشش سفید ایجاد شده روی برگ‌ها است که منجر به کاهش دمای سطح برگ می‌شود. این پایداری دمایی، تنش حرارتی و نوری القایی ناشی از خشکی را به حداقل رسانده و در نتیجه، پایداری آنزیم‌های کلیدی چرخه کالوین (به‌ویژه روبیسکو) و سرعت خالص فتوسنتز



شکل ۲- مقایسه میانگین صفت عملکرد بیولوژیک کینوا در مراحل مختلف اعمال تنش خشکی تحت شرایط محلول‌پاشی با آنتی‌تعرق‌ها. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با هم ندارند.

Figure 2. Interaction effects: comparison of the mean biological yield of quinoa at different stages of drought stress under foliar application of anti-transpirant treatments. Columns sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

شاخص برداشت

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان داد که سطوح مختلف تنش خشکی و مواد آنتی‌تغرق به طور مستقل بر شاخص برداشت تأثیر معنی‌داری داشتند. با این حال، برهم‌کنش این دو عامل روی این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۲). بالاترین مقدار شاخص برداشت کینوا در تیمار تنش کامل مشاهده شد، این تیمار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با تیمارهای تنش رویشی و زایشی نداشت اما با تیمار شاهد اختلاف معنی‌دار داشت (شکل ۳) نتایج مقایسه میانگین اثر محلول‌پاشی کائولین و فولویک اسید بر شاخص برداشت نشان داد که بیش‌ترین مقدار شاخص برداشت مربوط به تیمارهای آنتی‌تغرق‌ها شده با غلظت ۵ درصد کائولین به مقدار ۴۶/۹ درصد بود (شکل ۳). شاخص برداشت به‌عنوان نسبت ماده خشک دانه به کل ماده خشک گیاه، معیاری حیاتی از کارایی تخصیص منابع در پاسخ به تنش خشکی است. برخلاف عملکرد بیولوژیک که با افزایش تنش کاهش یافت، شاخص برداشت روندی متضاد و از نظر فیزیولوژیک، سازگارانه را نشان داد. به‌طور کلی، تیمارهای تنش خشکی منجر به افزایش معنی‌دار شاخص برداشت نسبت به شرایط شاهد آبیاری کامل شدند. این پدیده در گیاهانی مانند کینوا که دارای مکانیزم‌های نسبی تحمل تنش هستند، مشاهده می‌شود. کاهش شدیدتر و سریع‌تر در رشد اندام‌های رویشی (برگ و ساقه) نسبت به عملکرد دانه (تولید ماده خشک دانه) تحت محدودیت آبی، سبب می‌شود که گیاه با سرعت بیش‌تری منابع کربن ذخیره‌شده را به اندام‌های زایشی

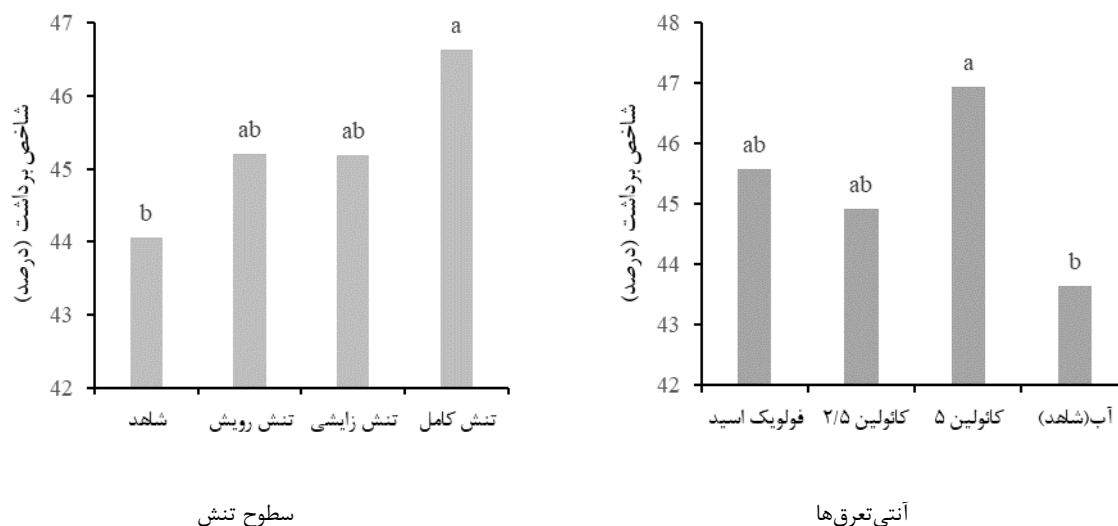
پمپاژ کند تا چرخه زندگی خود را تکمیل نماید (استراتژی فرار از تنش). این انتقال منابع، منجر به افزایش عددی شاخص برداشت می‌شود. در شدیدترین سطح تنش (تنش کامل)، بالاترین مقدار شاخص برداشت مشاهده شد که تأکید بر اولویت‌بندی گیاه برای بقای نسل و انتقال مواد فتوسنتزی ساخته‌شده، به اندام‌های اقتصادی است (Wnuk et al., 2013).

گیاهان تحت تیمار تنش کامل، بالاترین شاخص برداشت را ثبت کرد (۴۶/۹ درصد). این یافته نشان می‌دهد که گیاهانی که شدیدترین محدودیت آبی را تجربه کرده و رشد رویشی آن‌ها کاهش شدید یافته است، کارآمدترین تخصیص ممکن منابع باقی‌مانده را به دانه داشته‌اند. در مقایسه تیمارهای ضدتغرق با شاهد، تیمارهای آنتی‌تغرق فولویک اسید ۴۵/۵ درصد و کائولین ۲/۵ با حدود ۴۴/۹ درصد نسبت به شاهد آب، شاخص برداشت کمی بالاتر ثبت کردند که معنی‌دار نبود (شکل ۳). همان‌طور که کائولین و فولویک اسید در افزایش اجزای عملکرد در کل سطوح تنش خشکی مؤثر بودند، شاخص برداشت نیز تحت اثر این آنتی‌تغرق‌ها قرار گرفت. برتری مطلق شاخص برداشت در کائولین ۵ درصد نقش مهمی در تعدیل این تخصیص در سطوح تنش ملایم‌تر یا متوسط ایفا کردند. این امر قویاً نشان‌دهنده توانایی این مواد در حمایت از انتقال قندها به دانه در فاز بحرانی پر شدن دانه (از طریق بهبود وضعیت غذایی) است.

شاخص برداشت کینوا به دلیل سازوکار بیولوژیکی "فرار از تنش" با اولویت‌دهی به دانه، تحت تنش افزایش می‌یابد،

سطوح مختلف تنش ، شاخص برداشت را به شکل پایدارتری نسبت به شرایط شاهد آب حفظ کنند.

به طوری که بالاترین شاخص برداشت در تنش کامل مشاهده شد. تیمارهای آنتی تعرق (فولویک اسید و کائولین) با حفظ عملکرد بیولوژیک کل، توانستند در



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر مراحل مختلف اعمال تنش خشکی و محلول پاشی آنتی تعرقها بر شاخص برداشت کینوا. حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند.

Figure 3. Comparison of the mean effects of different stages of drought stress application and anti-transpirant foliar treatments on the harvest index of quinoa. Means sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

تیمارهای تنش کامل و تنش زایشی داشت. حساس‌ترین مرحله تنش کامل و زایشی است که شدیدترین کاهش وزن هزار دانه به‌ترتیب در شرایط تنش کامل کاهش ۲۱/۳ درصد نسبت به شاهد و تنش زایشی کاهش ۱۸/۶ درصد نسبت به شاهد رخ داد (شکل ۴). اهمیت تنش زایشی این یافته تأکید می‌کند که مرحله زایشی و پر شدن دانه، حساس‌ترین دوره به کم‌آبی است. تنش در این

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس مرکب برای صفت وزن هزار دانه در این پژوهش نشان داد که اثرات سطوح مختلف تنش خشکی و آنتی تعرق معنی‌دار بود (جدول ۲). بالاترین وزن هزار دانه در تیمار شاهد (آبیاری کامل)، مشاهده شد (شکل ۴). این تیمار از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با

پایداری عملکرد و اجزای عملکرد کینوا در شرایط کم آبی محسوب می شود (Hosseini et al., 2021).

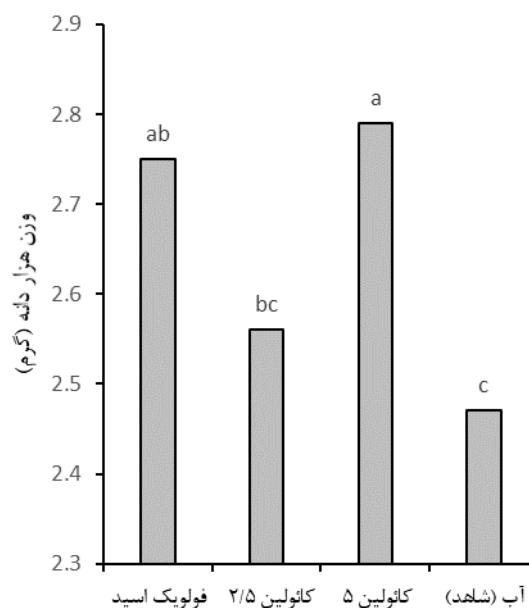
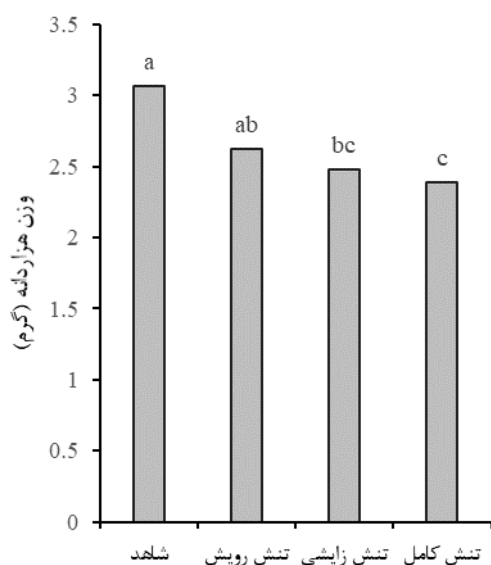
عملکرد دانه

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل واریانس مرکب نشان داد که هم تنش خشکی در چهار سطح و هم تیمارهای آنتی تعرق در چهار سطح (شامل کائولین ۵٪، کائولین ۲/۵ درصد فولیک اسید و شاهد آب) تأثیرات معنی دار آماری بر عملکرد دانه کینوا داشته اند (جدول ۲). این دو فاکتور اثرات متقابل معنی داری بر پتانسیل تولید محصول داشتند. در شکل ۵ مشخص است که بالاترین عملکرد در شرایط آبیاری کامل (شاهد) دیده می شود. با افزایش شدت تنش خشکی عملکرد به صورت تدریجی کاهش یافته است. افت عملکرد در تنش رویشی ۲۱/۴ درصد نسبت به شاهد بود، در حالی که تنش زایشی افت شدیدتری معادل ۲۵/۷ درصد کاهش مشاهده شد. تنش کامل شدیدترین تأثیر را بر عملکرد دانه ثبت کرده که نشان دهنده کاهش ۴۰/۵ درصدی نسبت به شرایط شاهد است. این روند کاهشی در عملکرد، به وضوح با کاهش فاکتورهای کمی دانه مانند وزن هزار دانه که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت (کاهش ۲۱/۳ درصد در تنش کامل)، هم راستا بود. کاربرد آنتی تعرق ها به ویژه تیمارهای حاوی کائولین، توانستند اثر مخرب تنش خشکی را کاهش دهند. در تمامی سطوح تنش (به استثنای شاهد آبیاری که اثر معنی داری نداشت)، تیمارهای کائولین به طور قابل توجهی عملکرد را نسبت به شاهد (تیمار محلول پاشی آب در هر سطح تنش) افزایش دادند. تیمار کائولین ۵٪ در

مرحله مستقیماً فرآورده های بیوشیمیایی کلیدی مانند انتقال مواد فتوسنتزی از اندام های ذخیره کننده به دانه و همچنین کاهش اندازه و تراکم سلول های آندوسپرم را مختل می کند، که نتیجه آن تولید دانه های سبک تر است. تأثیر کاهش وزن در تنش رویشی (۱۴/۷ درصد کاهش)، اگرچه قابل توجه است، اما کم تر از تنش زایشی بود. این کاهش عمدتاً ناشی از کاهش تولید زیست توده کلی است که به طور غیرمستقیم بر پتانسیل پر شدن دانه تأثیر می گذارد. تیمارهای کائولین و فولویک اسید تأثیر مثبتی بر بهبود وزن هزار دانه نشان دادند، که نشان دهنده موفقیت آن ها در حفظ فرآورده های پر شدن دانه تحت شرایط آزمایش بود. تیمار کائولین ۵٪ با ثبت بالاترین وزن هزار دانه، این تیمار به میزان ۱۳/۳ درصد وزن هزار دانه را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (شکل ۴). تیمار فولیک اسید وزنی بالاتر از شاهد و پایین تر از کائولین ۵٪ ثبت کرد، که نشان دهنده اشتراک آماری با هر دو است. کاهش وزن هزار دانه یک پاسخ مستقیم به تنش آبی است که بیش ترین تأثیر خود را در مراحل حیاتی پر شدن دانه اعمال می کند. با این حال، کاربرد کائولین ۵ درصد توانست با افزایش ۱۳/۳ درصد در این صفت، به طور مؤثری تعدیل کننده اثرات منفی تنش خشکی باشد. این امر پتانسیل بالای این پوشش دهنده را در حفظ کارایی فتوسنتزی و طولانی تر کردن دوره تجمع مواد فتوسنتزی در دانه، حتی در شرایط تنش، برجسته می سازد. استفاده استراتژیک از محلول پاشی مواد آنتی تعرق در مراحل رویشی و پر شدن دانه، یک راهکار عملی برای بهبود

علی‌رغم تفاوت‌های جزئی با کاربرد آنتی تعرق‌ها، از نظر آماری در یک گروه قرار دارند و نشان‌دهنده پتانسیل حداکثری عملکرد هستند. اثر حفاظتی تیمارهای کائولین در سطوح تنش رویشی و زایشی توانستند از افت شدید عملکرد کینوا جلوگیری و آن را در سطوح معنی‌داری بالاتری حفظ کنند (شکل ۵).

تمامی سطوح تنش خشکی، بالاترین میانگین عملکرد را در گروه خود ثبت کرد. در شرایط تنش کامل، عملکرد تحت این تیمار حدود ۲۲ درصد بیش‌تر از تیمار محلول‌پاشی شاهد در همان شرایط بود. فولویک اسید، این تیمار اثر تعدیل‌کننده مثبتی داشت اما از نظر آماری ضعیف‌تر از کائولین بود. تیمارهای شاهد بدون تنش،



سطوح تنش

آنتی تعرق‌ها

شکل ۴- مقایسه میانگین اثر مراحل مختلف اعمال تنش خشکی و محلول‌پاشی آنتی تعرق‌ها بر وزن هزار دانه کینوا. حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند.

Figure 4. Comparison of the mean effects of different stages of drought stress application and anti-transpirant foliar treatments on the thousand-grain weight of quinoa. Means sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

وزن هزاردانه را به‌طور مؤثری بهبود بخشید. این بهبود در شرایط بدون تنش، تنش رویشی و تنش پرشدن دانه

محلول‌پاشی مواد آنتی تعرق به عنوان یک راهبرد مدیریتی، عملکرد دانه و صفات کلیدی زایشی از جمله

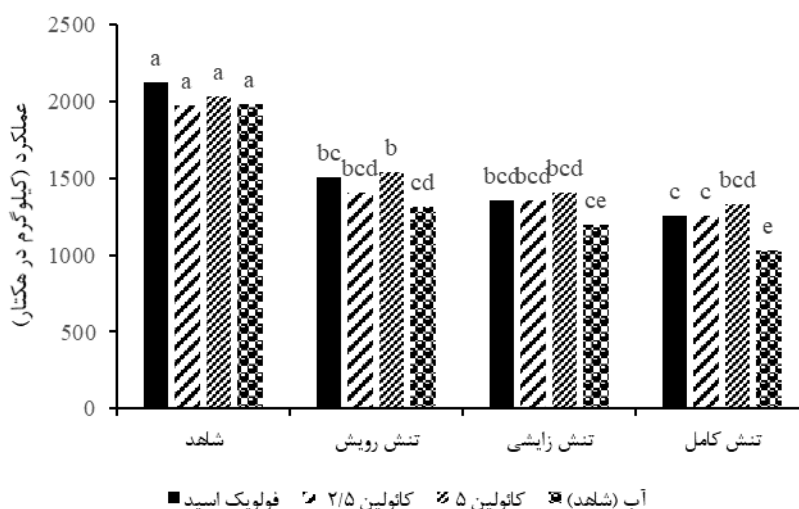
مشهود بود. مکانیسم اصلی این مواد، بهبود وضعیت آبی گیاه و کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی است که منجر به افزایش میزان کلروفیل برگ و در نهایت تقویت صفات رویشی و زایشی و افزایش عملکرد نهایی دانه شد (Hosseini et al., 2021). همچنین در گزارش دیگری نشان دادند که کاهش در عملکرد زیست توده با تغییر شرایط از آبیاری کامل به تنش خشکی نشان می‌دهد که کاهش توانایی گیاه در جذب عناصر غذایی و ساخت و انتقال مواد پرورده در اثر کمبود آب سبب کاهش تجمع ماده خشک می‌شود و این کاهش اثر مستقیمی روی عملکرد دانه دارد (Sabzi et al., 2017). فولویک اسید، بسیاری از ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه را هم در شرایط رطوبت بهینه و هم در شرایط تنش خشکی تحت تأثیر خود قرار داد. در شرایط تنش خشکی، کاربرد فولویک اسید باعث افزایش تعداد دانه، وزن هزار دانه و عملکرد گردید. در همین مورد یانگ و همکاران (2019) بهبود اجزای عملکرد ذرت را با کاربرد فولویک اسید گزارش کردند. تحقیقات قبلی نیز تأیید می‌کند که محلول‌پاشی برگ گیاهان با کائولین، تنش خشکی را کاهش و عملکرد را بهبود می‌بخشد (Nazim et al., 2021; Brito et al., 2019; Semida et al., 2023; Faghihi et al., 2025). در مطالعه‌ای نشان داده شد که تنش خشکی به طور قابل توجهی ماده خشک گیاه، و عملکرد را کاهش می‌دهد و در مقابل، وزن خشک اندام‌های هوایی و عملکرد، پس از محلول‌پاشی با فولویک اسید، تحت تنش خشکی به طور قابل توجهی افزایش یافت (Alsudays et

2024). مکانیسم عمل ممکن است به دلیل وزن مولکولی کم فولویک اسید باشد که می‌تواند به غشای سلولی نفوذ کرده و با کاتیون‌ها کمپلکس تشکیل دهد تا جذب مواد مغذی را افزایش دهد و در نتیجه تجمع ماده خشک و افزایش عملکرد را افزایش دهد (Lalas et al., 2018).

کارایی مصرف آب

نتایج آزمایش نشان داد که اثر سطوح مختلف تنش خشکی و آنتی‌تعرق‌ها روی کارایی مصرف آب معنی‌دار بود، اما اثر متقابل آن‌ها روی این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۲). کارایی مصرف آب به عنوان نسبت عملکرد به آب مصرفی، معیاری حیاتی برای سنجش سازگاری گیاه به کم‌آبی است. داده‌های مربوط به مراحل تنش خشکی (شکل ۶) نشان می‌دهد که تنش خشکی، اگرچه عملکرد کلی را کاهش می‌دهد، اما لزوماً بر WUE تأثیر یکسانی ندارد و می‌تواند بسته به شدت و مرحله اعمال، باعث افزایش نسبی کارایی شود (زیرا مصرف آب نیز کاهش می‌یابد). برخلاف عملکرد بیولوژیک، بالاترین کارایی مصرف آب (WUE) در شرایط تنش کامل (۴۳/ کیلوگرم در متر مکعب) ثبت شد. این یافته نشان‌دهنده یک سازوکار دفاعی رایج در گیاهان است: با کاهش شدید منابع آب، گیاه مکانیسم‌هایی (مانند بستن روزنه‌ها) را فعال می‌کند که باعث کاهش متناسب یا بیش‌تر مصرف آب نسبت به کاهش عملکرد می‌شود، و در نتیجه، WUE افزایش می‌یابد. در مقابل، شرایط شاهد آبیاری کامل (که

بالاترین مصرف آب را دارد) پایین‌ترین WUE را به میزان ۰/۳۵ کیلوگرم در متر مکعب ثبت کرد (شکل ۶).



شکل ۵- مقایسه میانگین صفت عملکرد دانه کینوا در مراحل مختلف اعمال تنش خشکی تحت شرایط محلول‌پاشی با آنتی‌تعرق‌ها. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با هم ندارند.

Figure 5. Interaction effects analysis: Comparison of the mean of quinoa grain yield trait under different stages of drought stress application when subjected to anti-transpirant foliar treatments. Columns sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

کائولین ۵٪ این تیمار با حفظ پتانسیل عملکردی خود در شرایط تنش، توانسته است WUE را به سطح بهینه برساند. افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد کائولین ۲/۵ درصد نشان‌دهنده تأثیر مثبت، اما کمی ضعیف‌تر از غلظت ۵٪ و فولویک اسید است (شکل ۶). اثر سطوح مختلف رژیم‌های آبی کینوا نشان داد که با افزایش

تیمارهای فولویک اسید (۰/۴۰ کیلوگرم در متر مکعب) و کائولین ۵٪ (۰/۴۱ کیلوگرم در متر مکعب) به طور مساوی بهترین عملکرد را در زمینه کارایی مصرف آب داشته و در بالاترین سطح قرار گرفته‌اند. این امر نشان می‌دهد که این تیمارها با حفظ عملکرد (نمودار عملکرد) یا تنظیم بهتر فرآیندهای تعرق، به بهبود مصرف آب کمک کرده‌اند.

رطوبتی مختلف، به ویژه در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک است.

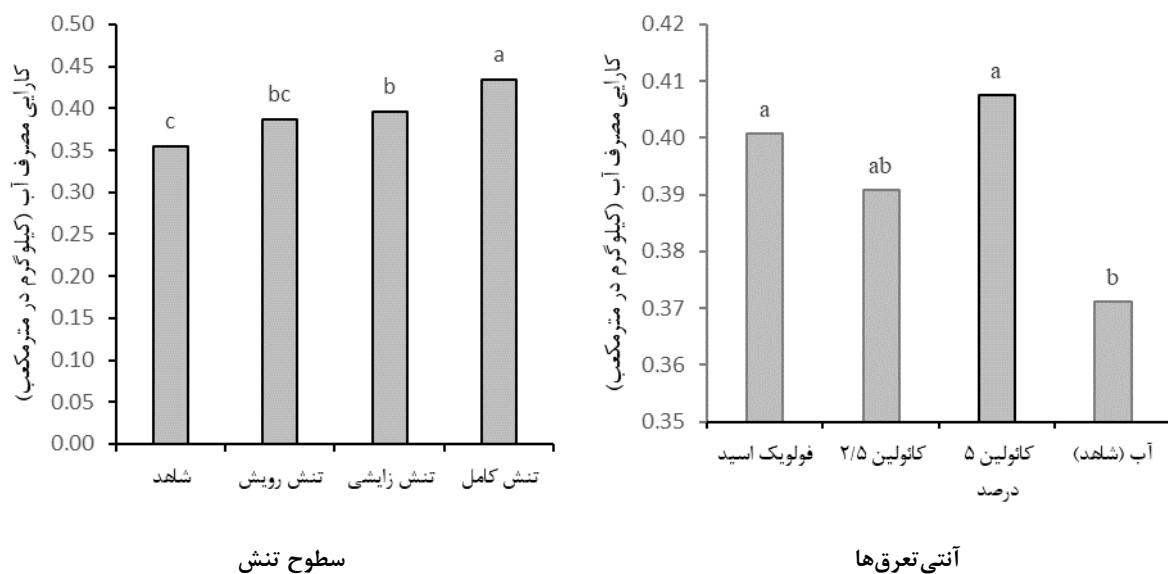
طول ریشه

نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌های مربوط به طول ریشه نشان داد که از لحاظ این صفت اثر متقابل سطوح مختلف تنش خشکی و آنتی‌تورق‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). طول ریشه یکی از شاخص‌های مورفولوژیکی مهم در ارزیابی پاسخ گیاه به تنش خشکی است؛ زیرا مستقیماً با عمق نفوذ و توانایی جذب آب مرتبط است. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که در تمامی تیمارهای تحت تنش، طول ریشه نسبت به شرایط آبیاری کامل (شاهد) به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به طوری که طول ریشه از ۲۲/۷۳ سانتی‌متر در شرایط شاهد به ۱۳/۸۵ سانتی‌متر در تنش کامل کاهش یافته است (شکل ۷) که نشان‌دهنده یک کاهش شدید در رشد سیستم ریشه‌ای تحت تنش است. این امر تأیید می‌کند که کمبود آب، مانع از گسترش عمودی و افقی سیستم ریشه برای جستجوی رطوبت می‌شود. محلول‌پاشی‌ها توانستند اثر بازدارنده تنش خشکی بر رشد ریشه را کاهش داده و سیستم ریشه‌ای را در شرایط کم‌آبی کارآمدتر حفظ کنند. بررسی عملکرد تیمارها در شدیدترین سطح تنش (تنش کامل) روشی مناسب برای ارزیابی قدرت حمایتی ترکیبات است کائولین ۵٪ با رسیدن به ۱۵/۷۵ سانتی‌متر، بالاترین طول ریشه را در شرایط تنش کامل ثبت کرد. این یافته بسیار مهم است زیرا نشان می‌دهد کائولین ۵٪ نه تنها بر بیوماس هوایی

آبیاری، کارایی مصرف آب کاهش یافت. دلیل افزایش WUE در تیمار تنش شدید خشکی را می‌توان افزایش عملکرد دانه کینوا با کاربرد آنتی‌تورق‌ها دانست (Moghaddam *et al.*, 2021). افزایش کارایی مصرف آب در گیاهان تحت تنش خشکی با کاربرد آنتی‌تورق‌ها برای سایر گونه‌های گیاهی نیز گزارش شده است (Fugate *et al.*, 2018). نتایج یافته‌ها نشان می‌دهند که در حالی که تنش کامل به طور طبیعی WUE گیاه را به دلیل کاهش شدید مصرف آب افزایش می‌دهد، استفاده از کائولین ۵٪ و فولیک اسید به طور مستقل موجب افزایش معنی‌دار و پایدار WUE شده است. این بدان معناست که این ترکیبات نه تنها عملکرد را حفظ کرده‌اند، بلکه به گیاه کمک کرده‌اند تا آب کم‌تری را برای تولید همان مقدار یا مقدار بیشتری از بیوماس مصرف نماید، که این امر نشان‌دهنده یک سازگاری فیزیولوژیکی مطلوب است. لایه ایجاد شده توسط کائولین متخلخل است، در تبادل گاز برگ اختلال ایجاد نمی‌کند، اجازه عبور تابش فعال فتوسنتزی را می‌دهد و تا حدی تابش مادون قرمز و ماوراء بنفش را مسدود می‌کند، و محلول‌پاشی آن بر روی برگ محتوای فیتوشیمیایی و بیوشیمیایی، وضعیت آب گیاه، پایداری غشاء و افزایش عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشد. (Nazim *et al.*, 2021). کائولین در شرایط تنش خشکی، با حفظ فتوسنتز تا حد بیشتری، اثرات شدید تنش خشکی را کاهش می‌دهد. به طور کلی، به نظر می‌رسد کائولین ابزاری امیدوارکننده برای بهینه‌سازی راندمان مصرف آب و حفظ بهره‌وری گیاه در شرایط

تأثیر مثبت داشته (عملکرد بالاتر)، بلکه رشد ریشه را نیز به طور مؤثرتری نسبت به سایر تیمارها تحت تنش شدید حفظ کرده است. فولیک اسید طول ریشه را به ۱۴/۰۲ سانتی‌متر رساند بود، که نسبت به کائولین‌ها ضعیف‌تر عمل کرد. شاهد آب (محلول‌پاشی آب) با ۱۳/۸۵ سانتی‌متر، ضعیف‌ترین طول ریشه را در شرایط تنش کامل داشت. حتی در شرایط آبیاری کامل، تیمارها تأثیر خود را نشان دادند فولیک اسید ۲۵/۳۷ سانتی‌متر و کائولین ۵٪ مقدار ۲۴/۹۵ سانتی‌متر بهترین رشد ریشه‌ای را در شرایط بهینه نشان دادند، که این امر بر پتانسیل ذاتی این ترکیبات برای تحریک رشد تأکید دارد. این مقادیر اندکی بالاتر از شاهد آب ۲۲/۷۳ سانتی‌متر هستند (شکل ۷)، که نشان می‌دهد این مواد در غیاب تنش نیز می‌توانند رشد را تحریک کنند. نتایج طول ریشه یک هم-سویی فیزیولوژیکی با یافته‌های عملکرد بیولوژیک و کارایی مصرف آب ارائه می‌دهند. نقش کائولین در حفظ ساختار ریشه، کائولین ۵٪ در حفظ طول ریشه در شرایط تنش کامل (۱۵/۷۵ سانتی‌متر)، مکانیزم احتمالی افزایش عملکرد بیولوژیک و WUE در این تیمار را تبیین می‌کند. ریشه بلندتر، توانایی بیشتری برای دسترسی به رطوبت باقی‌مانده در عمق خاک دارد، که این امر به حفظ فرآیندهای بیوشیمیایی و در نتیجه عملکرد بهتر منجر می‌شود. در حالی که فولیک اسید در WUE و عملکرد کلی بسیار مؤثر بود، تأثیر آن بر طول ریشه تحت تنش

کامل (۱۴/۰۲ سانتی‌متر) نسبت به کائولین ۵٪ مقدار ۱۵/۷۵ سانتی‌متر کمتر است. این ممکن است نشان دهد که فولیک اسید بیشتر بر تنظیم روزنه‌ای و تنش اکسیداتیو (حفظ WUE) تمرکز کرده، در حالی که کائولین علاوه بر آن، بر توسعه ساختاری ریشه نیز تأثیر چشم‌گیری داشته است. در رابطه با عملکرد کاهش طول ریشه زیر ۱۴ سانتی‌متر در تیمارهای شاهد آب تحت تنش کامل، مستقیماً با کاهش شدید عملکرد (۱۲۵۰ کیلوگرم) و WUE (۴۳۴۲/ کیلوگرم در متر مکعب) مطابقت دارد. تیمارهایی که توانستند این کاهش را به حداقل برسانند (مانند کائولین ۵٪)، بهترین نتایج عملکردی را در شرایط تنش از خود نشان دادند. به طور خلاصه، کائولین ۵٪ به عنوان یک تنظیم‌کننده رشد مؤثر، با حداکثر تحریک رشد طولی ریشه در شرایط تنش، توانسته است مزیت رقابتی در جذب آب ایجاد کند که در نهایت منجر به بالاترین عملکرد و حفظ تعادل در WUE شده است. در شرایط تنش شدید خشکی، تنش اکسیداتیو می‌تواند به دستگاه فتوسنتزی آسیب برساند و تولید ترکیبات فتوسنتزی را کاهش دهد. علاوه بر این، کاهش جذب آب توسط ریشه‌ها موجب اختلال در انتقال آب و مواد فتوسنتزی در آوندهای چوبی و آبکش می‌شود که در نهایت بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ریشه تأثیر می‌گذارد (Farooq et al., 2010).



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر مراحل مختلف اعمال تنش خشکی و محلول پاشی آنتی تعرقها بر کارایی مصرف آب کینوا. حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با هم ندارند.

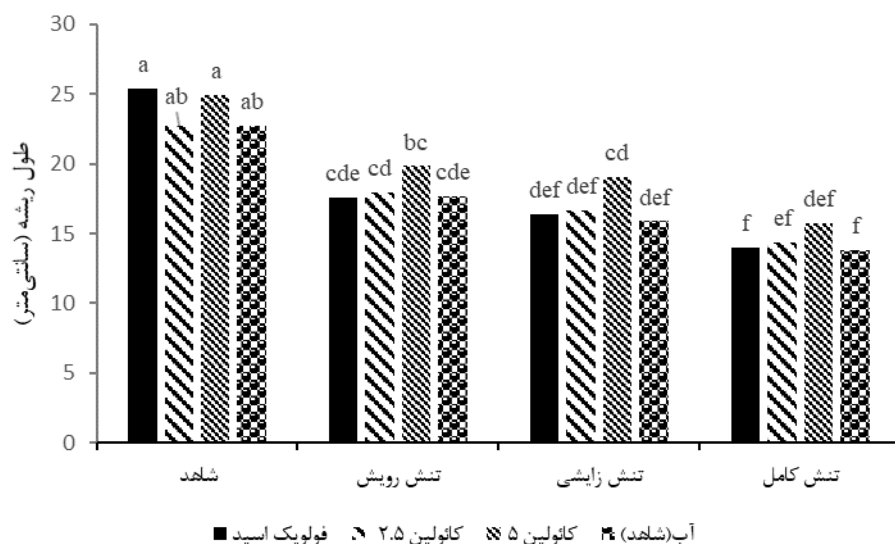
Figure 6. Comparison of the mean effects of different stages of drought stress application and anti-transpirant foliar treatments on the water use efficiency of quinoa. Means sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

جدول ۲ - تجزیه واریانس صفات مورفولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد کینوا تحت شرایط تنش خشکی و محلول پاشی آنتی تعرق ها (میانگین مربعات)

Table 2. Analysis of Variance for morphological traits, yield, and yield components of quinoa under drought stress and foliar application of antitranspirants (Mean Square)

منابع تغییرات S. O. V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant Height	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest Index	وزن هزار دانه 1000 grain Weight	عملکرد دانه Grain yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency
سال Year (Y)	1	1.76 ^{ns}	12172.51 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.14 ^{ns}	15580.51 ^{ns}	0.0031 ^{ns}
تکرار (سال) Block	4	19.41	78177.96	10.92	0.08	36106.29	0.00013
تنش Stress(S)	3	4717.42 ^{**}	12021135.2 ^{**}	26.52 ^{**}	2.21 [*]	3131446.78 ^{**}	0.26 ^{**}
سال × تنش Stress×Year	3	8.03 ^{ns}	9322.76 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.08 ^{ns}	14268.84 ^{ns}	0.00006 ^{ns}
خطای اصلی Error a	12	157.47	46454.68	12.61	0.11	50602.72	0.003
آنتی تعرق Antitranspirants (A)	3	453.92 ^{**}	138501.76 [*]	45.00 [*]	0.53 ^{**}	190994.53 ^{**}	0.0059 ^{**}
تنش × آنتی تعرق S×A	9	102.16 ^{**}	77319.05 ^{**}	0.42 ^{ns}	0.02 ^{ns}	17874.96 ^{**}	0.0005 ^{ns}
سال × آنتی تعرق Y×A	3	11.87 ^{ns}	13321.7 ^{ns}	3.22 ^{ns}	0.003 ^{ns}	26720.26 ^{ns}	0.0002 ^{ns}
سال × تنش × آنتی تعرق Y×S×A	9	17.22 ^{ns}	8531.47 ^{ns}	0.24 ^{ns}	0.01 ^{ns}	3142.44 ^{ns}	0.0002 ^{ns}
خطای فرعی Error b	48	64.27	49540.01	19.55	0.12	36710.50	0.0022
ضریب تغییرات (CV) %		9.65	6.09	9.76	13.14	12.73	12.13

ns, * و ** به ترتیب بیانگر تفاوت غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشند
ns, *, ** non-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۷- مقایسه میانگین صفت طول ریشه کینوا در مراحل مختلف اعمال تنش خشکی تحت شرایط محلول‌پاشی با آنتی‌تعرق‌ها. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با هم ندارند.

Figure 7. Interaction effects analysis: Comparison of the mean of quinoa root length trait under different stages of drought stress application when subjected to anti-transpirant foliar treatments. Columns sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 1% probability level.

محلول‌پاشی آنتی‌تعرق‌ها در تیمار تنش کامل به ترتیب

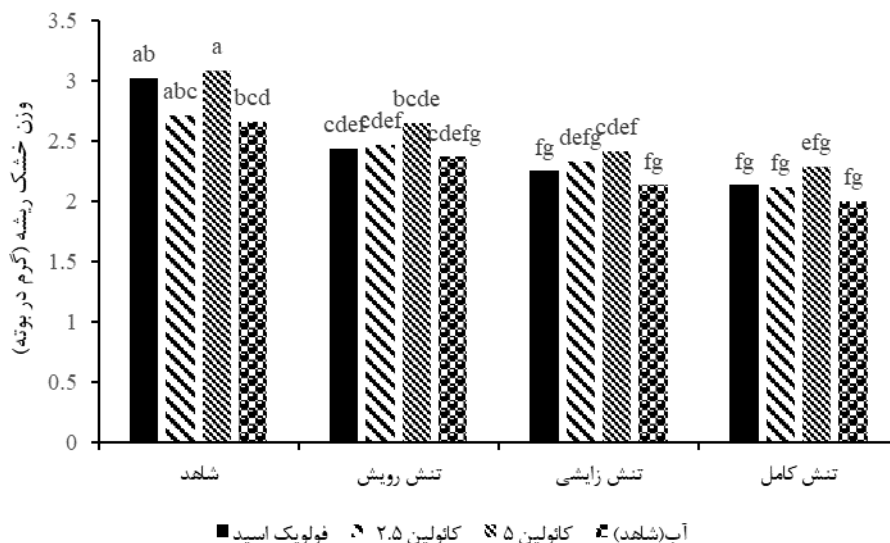
وزن خشک ریشه

۱۴/۱۵ و ۶/۶۵ درصد افزایش داد. در مرحله تنش زایشی، کائولین ۵٪ (۲/۴۱۷ گرم در بوته) و کائولین ۲/۵ درصد (۲/۳۳۳ گرم در بوته) عملکردی بهتر از فولیک اسید (۲/۲۵ گرم در بوته) از خود نشان داده‌اند. (شکل ۹). ریشه گیاه نقش مهمی در پاسخ به تنش خشکی دارد، در شرایط تنش خشکی، ریشه‌های گیاه می‌توانند به سرعت برای مقابله با کمبود آب تنظیم شوند (Claeys et al, 2013). هم‌راستا با نتایج به دست آمده، گزارش شده است که با افزایش خشکی در گیاهی مانند کینوا که به تنش اسمری مقاوم است، از رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی کاسته می‌شود، اما کاهش رشد اندام‌های زیرزمینی کم‌تر

نتایج حاصل از تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳) حاکی از آن بود که مقدار وزن خشک ریشه تحت تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف تنش خشکی، تیمارهای آنتی‌تعرق‌ها و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت. حداکثر وزن خشک ریشه در تیمار آبیاری کامل (شاهد) با کاربرد کائولین ۵ درصد و فولیک اسید ثبت شد و کم‌ترین آن نیز به تیمار تنش کامل بدون کاربرد آنتی‌تعرق‌ها (شاهد) تعلق داشت (شکل ۹). علاوه بر این، مقدار وزن خشک ریشه در شرایط تنش کامل خشکی و تنش زایشی در مقایسه با عدم تنش ۲۴/۷۵ و ۱۹/۷۵ درصد کاهش یافتند. در مقابل، استفاده از تیمار کائولین و فولیک اسید را در مقایسه با عدم

از اندام‌های هوایی است. به عبارت دیگر، در این گیاهان تحت شرایط تنش خشکی، اختصاص کربوهیدرات‌ها به ریشه نسبت به ساقه اولویت دارد و به همین دلیل وزن ماده خشک به نسبت بیش‌تری دچار کاهش می‌شود (Hinojosa *et al.*, 2018). در آزمایش دیگری نیز با افزایش شدت خشکی، به‌ویژه تحت تیمار تنش شدید و کاربرد آنتی‌تعرق‌ها، تجمع ماده خشک ریشه به طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت (Brunner *et al.*, 2015). استراتژی‌های جلوگیری از کم‌آبی، متکی به مکانیسم‌هایی است که در آن نرخ از دست دادن آب و جذب آب متعادل بماند. از دست دادن آب با بسته شدن روزنه و در طولانی مدت با محدود کردن رشد ساقه و تشکیل ریشه‌های عمیق منجر به افزایش نسبت ریشه به ساقه می‌شود (Brunner *et al.*, 2015). در شرایط تنش، کاهش سطح برگ، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش جذب و انتقال آب و عناصر غذایی به دنبال کاهش رطوبت در منطقه ریشه و به طور کلی به کارگیری مکانیسم‌های تحمل و مقاومت به خشکی توسط گیاه از یک طرف منجر به کاهش تولید و انتقال آسیمیلات به ریشه‌ها شده است، در مقابل افزایش تقاضا برای دریافت آسیمیلات توسط دانه‌های در حال رشد باعث شده است که ویژگی‌هایی مثل حجم و وزن خشک ریشه به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و از نظر کمی کاهش یابند (Babaei *et al.*, 2010).

فولویک اسید با تقویت سیستم ریشه، موجب افزایش بهره‌وری عناصر غذایی و بهبود پایداری عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی می‌شود (Grammenou *et al.*, 2023). وزن خشک ریشه معیار کمی برای سنجش توانایی گیاه در تخصیص منابع و ساختاردهی برای بقا تحت شرایط نامساعد است. کاهش شدید وزن خشک ریشه نشان‌دهنده محدودیت جدی در فتوسنتز و انتقال کربن به اندام‌های زیرزمینی است. این کاهش نشان‌دهنده کاهش فتوسنتز و افت تولید کربن در اندام هوایی است (Fang *et al.*, 2020). گیاه کربن کم‌تری را به سمت ریشه که نیاز به انرژی زیادی برای رشد و جذب فعال دارد، هدایت می‌کند. وزن خشک ریشه به طور مستقیم با عملکرد بیولوژیک مرتبط است؛ بنابراین، نتایج وزن خشک ریشه یک ارتباط مثبت قوی با عملکرد گزارش شده در بخش اول فراهم می‌آورد، بالاترین وزن خشک ریشه تحت تنش کامل (۲/۲۸۳ گرم در بوته با کائولین ۵٪) با بالاترین عملکرد بیولوژیک در همان تیمار هم‌خوانی دارد که نشان‌دهنده ارتباط بین این دو صفت می‌باشد. این نشان می‌دهد که حفظ بیوماس ریشه، زیربنای حفظ پتانسیل تولید محصول در شرایط استرس است.



شکل ۹- مقایسه میانگین صفت وزن خشک ریشه کینوا در مراحل مختلف اعمال تنش خشکی تحت شرایط محلول‌پاشی با آنتی‌تعرق‌ها. ستون‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد با هم ندارند.

Figure 9. Interaction effects analysis: Comparison of the mean of quinoa **dry weight of root** trait under different stages of drought stress application when subjected to anti-transpirant foliar treatments. Columns sharing the same letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

نتیجه‌گیری

در مقابل، تیمار کائولین به‌ویژه در غلظت ۵ درصد با

کاهش تعرق، حفظ رطوبت ریشه و افزایش وزن خشک ریشه و عملکرد بیولوژیک، از پایداری ساختاری بالاتری برخوردار شد. در نتیجه، فولویک اسید از مسیر تنظیمات درون‌سلولی و کائولین از طریق کاهش اتلاف آب، به تحمل بهتر گیاه در برابر خشکی کمک کردند. ترکیب یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان یا هدفمند از این دو ترکیب می‌تواند مکانیسم‌های فیزیولوژیک و ساختاری گیاه را در برابر تنش خشکی هماهنگ کرده و به پایداری عملکرد در شرایط کم‌آبی منجر شود.

افزایش شدت تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار در صفات وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع بوته، طول ریشه و وزن خشک ریشه گردید. این کاهش بیان‌گر اختلال در فرآیندهای جذب آب، فتوسنتز و تخصیص مواد فتوسنتزی است. با این حال، کاربرد آنتی‌تعرق‌ها توانست اثرات منفی تنش را تا حد قابل توجهی تعدیل نماید. تیمار فولویک اسید با حفظ تورژسانس سلولی، افزایش وزن تر ریشه و ارتقای کارایی مصرف آب، نشان‌دهنده سازگاری فیزیولوژیکی برتر بود.

جدول ۳ - تجزیه واریانس برخی صفات مورفولوژیک ریشه کینوا تحت تنش خشکی و محلول پاشی آنتی تعرق ها (میانگین مربعات)

Table 3. Analysis of Variance (ANOVA) of some morphological root traits of quinoa under drought stress and foliar application of antitranspirants (Mean Square)

وزن خشک ریشه Dry Weight of Root	طول ریشه Root length	درجه آزادی DF	منابع تغییرات
0.162 ^{ns}	0.055 ^{ns}	1	سال Yield(Y)
0.035 ^{ns}	0.925 ^{ns}	4	تکرار (سال) Block
2.43 ^{**}	385.29 ^{**}	3	تنش Stress(A)
0.029 ^{ns}	0.663 ^{ns}	3	سال × تنش S×Y
0.105	3.963	12	خطای اصلی Error
0.418 ^{**}	25.618 ^{**}	3	آنتی تعرق Antitranspirants
0.036 [*]	3.036 ^{**}	9	تنش × آنتی تعرق S×A
0.006 ^{ns}	0.425 ^{ns}	3	سال × آنتی تعرق Y×A
0.009 ^{ns}	0.321 ^{ns}	9	سال × تنش × آنتی تعرق Y×S×A
0.101	8.516	48	خطای فرعی E
13.04	15.43	-	ضریب تغییرات (CV) %

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome, 300*(9), D05109.
- Alsudays, I. M., Alshammary, F. H., Alabdallah, N. M., Alatawi, A., Alotaibi, M. M., Alwutayd, K. M., Alharbi, M.M., Alghanem, S.M., Alzuaibr, F.M., Gharib, H.S., & Awad-Allah, M. M. 2024. Applications of humic and fulvic acid under saline soil conditions to improve growth and yield in barley. *BMC Plant Biology*, 24(1), 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04589-7>.
- Azooz MM, Ahmad P. 2015. Legumes under environmental stress: yield, improvement and adaptations. Chichester, West Sussex, PO19 8SQ: John Wiley & Sons Limited, The Atrium, Southern Gate. <https://lccn.loc.gov/2014025842>
- Babae, K., Amini Dehaghi, M., Modares Sanavi, S. A. M., & Jabbari, R. 2010. Water deficit effect on morphology, prolin content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris*)

- L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 26(2), 239-251. <https://doi.org/10.2292/ijmapr.2010.6939>.
- Brito, C., Dinis, L. T., Luzio, A., Silva, E., Gonçalves, A., Meijón, M., Escandón, M., Arrobas, M., Rodrigues, M.Â., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. M. 2019. Kaolin and salicylic acid alleviate summer stress in rainfed olive orchards by modulation of distinct physiological and biochemical responses. *Scientia Horticulturae*, 246, 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.059>.
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M., & Sperisen, C. 2015. How tree roots respond to drought. *Frontiers in plant science*, 6, 547. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>.
- Buko, D. H. 2011. Freezing tolerance and expression of candidate genes in timothy (*Phleum pratense* L.) [sic]. (No Title). <https://agris.fao.org/>.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>.
- Chen, J. F., Yeh, H. F., Lee, C. H., & Lo, W. C. 2005. Optimal comparison of empirical equations for estimating potential evapotranspiration in Taiwan. *31st IAHR Congress 2005: Water Engineering for the Future, Choices and Challenges* (pp. 3687-3697). Korea Water Resources Association. <https://doi.org/10.2298/FUACE1002163T>.
- Chen, X., Zhang, X., Chen, H., & Xu, X. 2022. Physiology and proteomics reveal Fulvic acid mitigates Cadmium adverse effects on growth and photosynthetic properties of lettuce. *Plant Science*, 323, 111418. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111418>.
- Claeys, H., & Inzé, D. 2013. The agony of choice: how plants balance growth and survival under water-limiting conditions. *Plant physiology*, 162(4), 1768-1779.
- Contreras-Jiménez, B., Torres-Vargas, O. L., & Rodríguez-García, M. E. 2019. Physicochemical characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa*) flour and isolated starch. *Food chemistry*, 298, 124982. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124982>.
- Faghihi, E., Aghamir, F., Mohammadi, M., & Eghlima, G. 2025. Kaolin application improved growth performances, essential oil percentage, and phenolic compound of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *BMC Plant Biology*, 25(1), 892. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06847-6>.
- Fang, Z., Wang, X., Zhang, X., Zhao, D., & Tao, J. 2020. Effects of fulvic acid on the photosynthetic and physiological characteristics of *Paeonia ostii* under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 15(7), 1774714. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774714>.
- Farooq, M., Wahid, A., Lee, D. J., Cheema, S. A., & Aziz, T. 2010. Drought stress: comparative time course action of the foliar applied glycinebetaine, salicylic acid, nitrous oxide, brassinosteroids and spermine in improving drought resistance of rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196(5), 336-345. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00422.x>.
- Farouk, S., Al-Huqail, A. A., & El-Gamal, S. M. 2023. Potential role of biochar and silicon in improving physio-biochemical and yield characteristics of borage plants under different irrigation regimes. *Plants*, 12(8), 1605. <https://doi.org/10.3390/plants12081605>.
- Fischer, S., Wilckens, R., Jara, J., Aranda, M., Valdivia, W., Bustamante, L., Obal, I. 2017. Protein and antioxidant composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) sprout from seeds submitted to water stress, salinity and light conditions. *Industrial Crops and Products*, 107, 558-564. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.072>.

- Food and Agriculture Organization. 2011. "An ancient crop to contribute to world food security". Regional Office for Latin America and the Caribbean. Agroecological and Agronomic, July. 2, 73-87. <https://www.fao.org/americas/en>.
- Fugate, K. K., Lafta, A. M., Eide, J. D., Li, G., Lulai, E. C., Olson, L. L., & Finger, F. L. 2018. Methyl jasmonate alleviates drought stress in young sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(6), 566-576. <https://doi.org/10.1111/jac.12291>.
- Ghanbari, F., Cheraghi, M., & Erfani Moghadam, J. 2021. The effect of kaolin on drought stress tolerance and some physiological responses of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *J. Veg. Sci.*, 5(9), 63–75. <https://doi.org/10.22034/iuvs.2020.137652.1122>. [In Persian]
- Gong, G. Q., Yuan, X., Zhang, Y. J., Li, Y. J., Liu, W. X., Wang, M., Zhao, Y.F., & Xu, L. W. 2020. Characterization of coal-based fulvic acid and the construction of a fulvic acid molecular model. *RSC advances*, 10(9), 5468-5477. <https://doi.org/10.1039/C9RA09871D>.
- Goreta, S., Leskovar, D. I., & Jifon, J. L. 2007. Gas exchange, water status, and growth of pepper seedlings exposed to transient water deficit stress are differentially altered by antitranspirants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(5), 603-610. <https://doi.org/10.21273/JASHS.132.5.603>.
- Grammenou, A., Petropoulos, S. A., Thalassinou, G., Rinklebe, J., Shaheen, S. M., & Antoniadis, V. 2023. Biostimulants in the soil–plant interface: agro-environmental implications—a review. *Earth Systems and Environment*, 7(3), 583-600. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00370-1>.
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Radicetti, E., Rasouli, F., Ruiz-Lozano, J. M., & Sabbatini, P. 2024. Adoption of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar for alleviating the agro-physiological response of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) subjected to drought stress. *Plant Stress*, 12, 100461. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100461>.
- Hareem, M., Danish, S., Obaid, S. A., Ansari, M. J., & Datta, R. 2024. Mitigation of drought stress in chili plants (*Capsicum annuum* L.) using mango fruit waste biochar, fulvic acid and cobalt. *Scientific Reports*, 14(1), 14270. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64046-1>.
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., & Murphy, K. M. 2018. Quinoa abiotic stress responses: A review. *Plants*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>.
- Hossain, M. S., Li, J., Sikdar, A., Hasanuzzaman, M., Uzizerimana, F., Muhammad, I., Yuan, Y., Zhang, C., Wang, C., & Feng, B. 2020. Exogenous melatonin modulates the physiological and biochemical mechanisms of drought tolerance in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.). *Molecules*, 25(12), 2828. <https://doi.org/10.3390/molecules25122828>.
- Hosseini S.N., Jalilian J & ,Gholinezhad E. 2021. The effect of ascorbic acid, salicylic acid, and nano-micronutrient chelate fertilizer on yield and yield components of quinoa under waterdeficit stress *Journal of Crops Improvement* .۵۴۹–۵۶۱ ,(۳)۲۳ [In Persian]
- Jaberi, H., Lotfi, B., Feilinezhad, A.R., Fathi, A., KianErsi, F., & Abdollahi, A. 2016. Effects of salinity stress, salicylic acid and *Pseudomonas* on the physiological characteristics and yield of seed beans (*Phaseolus vulgaris*). *Advances in Bioresearch*, 7(5), 27-31. <https://doi.org/10.15515/abr.0976> 4585.7.5.2731.
- Jacobsen, S. E. 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food reviews international*, 19(1-2), 167-177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>.

- Jayme-Oliveira, A., Ribeiro, W. Q., Ramos, M. L. G., Ziviani, A. C., & Jakelaitis, A. 2017. Amaranth, quinoa, and millet growth and development under different water regimes in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(8), 561-571. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800006>.
- Kianinezhad, H., & Safarzadeh Vishekaei, M. N. 2022. Investigating the physiological traits of quinoa genotypes (*Chenopodium quinoa Willd.*) under salt stress conditions. *Cereal Biotechnology and Biochemistry*, 1(2), 231-248. [In Persian]
- Lalas, S., Athanasiadis, V., & Dourtoglou, V. G. 2018. Humic and fulvic acids as potentially toxic metal reducing agents in water. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 46(2), 1700608. <https://doi.org/10.1002/clen.201700608>.
- Liang, Y., Wang, J., Wang, Z., Hu, D., Jiang, Y., Han, Y., & Wang, Y. 2024. Fulvic acid alleviates the stress of low nitrogen on maize by promoting root development and nitrogen metabolism. *Physiologia Plantarum*, 176(2), e14249. <https://doi.org/10.1111/ppl.14249>.
- Moghaddam, P. R., Khorramdel, S., Latifi, H., Belgerdi, M. F., & Davarpanah, S. J. 2021. Optimization of irrigation and nitrogen levels on yield, water use efficiency, and nitrogen use efficiency of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) by using the surface-response methodology. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2021.68436.1013>.
- Mokari, M., Dehghan, H., & Taherian, M. 2020. Effects of dynamic and static new deficit irrigation strategies on the yield and water productivity of two field grown corn cultivars. <https://doi.org/10.47176/jwss.23.4.22992>.
- Moradi-Ghahderijani, M., Jafarian, S., & Keshavarz, H. 2017. Alleviation of water stress effects and improved oil yield in sunflower by application of soil and foliar amendments. *Rhizosphere*, 4, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.rhis.2017.06.005>.
- Nazim, M., Ali, M., Shahzad, K., Ahmad, F., Nawaz, F., Amin, M., Anjum, S., Nasif, O., Alharbi, S.A., Fahad, S., & Datta, R. 2021. Kaolin and Jasmonic acid improved cotton productivity under water stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(11), 6606-6614. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.07.071>.
- Rathore, S., & Kumar, R. 2021. Vermicompost fertilization and pinching improves the growth, yield, and quality of super food (*Chenopodium quinoa Willd.*) in the western Himalaya. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(2), 23. [10.1007/s11738-020-03184-z](https://doi.org/10.1007/s11738-020-03184-z)
- Sabzi, S., Tahmasebi, Z., & Barari, M. 2017. Study of the yield and some important plant of common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes at different moisture levels. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 10(1), 21-30.
- Saour, G. 2005. Morphological assessment of olive seedlings treated with kaolin-based particle film and biostimulant. *Advances in Horticultural Science*, 193-197. <https://doi.org/10.1400/52410>.
- Semida, W., Emara, A., Ghoneim, I. M., & Barakat, M. A. 2023. Kaolin foliar application enhanced physiological functions and pods quality of (*phaseolus vulgaris L.*) under deficit irrigation regimes. *Labyrinth: Fayoum Journal of Science and Interdisciplinary Studies*, 1(1), 84-94.
- Talebnejad, R., & Sepaskhah, A. R. 2015. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. *Agricultural Water Management*, 159, 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.023>.
- Vega-Galvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. 2010. Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa willd.*), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(15), 2541-2547. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4158>.

- Weerasinghe, M. M., Kettlewell, P. S., Grove, I. G., & Hare, M. C. 2016. Evidence for improved pollen viability as the mechanism for film antitranspirant mitigation of drought damage to wheat yield. *Crop and Pasture Science*, 67(2), 137-146. <https://doi.org/10.1071/CP15264>.
- Wilson, H. D., & Heiser Jr, C. B. 1979. The origin and evolutionary relationships of 'huauzontle' (*Chenopodium nuttalliae* Safford), domesticated chenopod of Mexico. *American Journal of Botany*, 66(2), 198-206. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1979.tb07514.x>.
- Xu, X., He, P., Pampolino, M.F., Li, Y., Liu, S., Xie, J., Hou, Y., & Zhou, W. 2016. Narrowing yield gaps and increasing nutrient use efficiencies using the Nutrient Expert system for maize in Northeast China. *Field Crops Research*, 194, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.05.005>.
- Wnuk, A., Górny, A. G., Bocianowski, J., & Kozak, M. 2013. Visualizing harvest index in crops. *Communications in Biometry and Crop Science*, 8(2), 48-59.
- Yang, W., Li, P., Guo, S., Song, R., & Yu, J. 2019. Co-application of soil superabsorbent polymer and foliar fulvic acid to increase tolerance to water deficit maize: photosynthesis, water parameters, and proline. *Chilean journal of agricultural research*, 79(3), 435-446. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000300435>.
- Yu, B., Xue, X., Nie, P., Lu, N., & Wang, L. 2024. Fulvic acid alleviates cadmium-induced root growth inhibition by regulating antioxidant enzyme activity and carbon–nitrogen metabolism in apple seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1370637. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1370637>.
- Zhu, S., Mi, J., Zhao, B., Wang, Z., Yang, Z., Wang, M., & Liu, J. 2024. Integrative transcriptome and metabolome analysis reveals the mechanism of fulvic acid alleviating drought stress in oat. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1439747. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1439747>.
- Zlatev, Z., & Lidon, F. C. 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 24(1). <https://doi.org/10.9755/ejfa.v24i1.10599>.