Plant Prod., 2026, 48(4), 547-566
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.47985.2207
Received: 27 September 2024
Accepted:17 March 2025

Plant Productions

Research Article

Evaluation of the effects of different levels of vermicompost and gamma-aminobutyric acid on gowth traits and grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress levels

Mehdi Jamshideyni[1], Mohammad Ali Behdani[2*], Soheil Parsa[3], Surur Khoramdel[4]

1. Ph.D Graduate, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, South Khorasan, Birjand, Iran
2. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, South Khorasan, Birjand, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Birjand, South Khorasan, Birjand, Iran
4. Associate Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Citation: Jamshideyni, M., Behdani, M.A., Parsa, S., Khoramdel, S. (2026). Evaluation of the effects of different levels of vermicompost and gamma-aminobutyric acid on gowth traits and grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress levels. *Plant Productions*, 48(4), 547-566.

Abstract

Introduction

Environmental stresses are the most important factors limiting the growth and production of crops in the world. Among the environmental stresses, drought or water shortage is considered as the strongest and most sophisticated reducing factor for crop and food security threatening which is solely responsible for 45% of the reduction in crop yield in different parts of the globe. Drought stress and nutrient limitation, especially in arid and semi-arid conditions, have severe consequences on crop yield. Therefore, finding new solutions to increase the resistance of plants is essential. Quinoa is highly resistant to drought and salt stress and can grow well in soils with lack of nutrient. The high tolerance of this plant to abiotic stresses has made this plant highly adaptable to different climatic conditions. Therefore, quinoa can be used as a suitable plant for nutrition (i.e., food security) and achieving sustainable agriculture.

Materials and Methods

The current study was performed in two experimental stations in Birjand and Mashhad, Iran, in

* **Corresponding Author:** Mohammad Ali Behdani
E-mail: mabehdani@birjand.ac.ir

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2019. Experiments were similarly conducted as the factorial split with four replicates. Irrigation regimes at 3 levels (50, 75, and 100% of water requirement) was the main plot and vermicompost (0 and 5 t. ha^{-1}) × GABA (0, 5, and 10 mg. l^{-1}) were the subplot. Growth indices were measured in six stages and then the content of malondialdehyde, grain yield and amino acids were measured in full flowering stage and physiological ripening stage respectively.

Results and Discussion

According to the results of data analysis, increasing drought stress levels caused a decreased effect on plant height, Leaf Area Index (LAI), Crop Growth Rate (CGR), and Relative Growth Ra (RGR). For example, in the fourth stage (flowering stage) in Mashhad, after applying 5 t. ha^{-1} of vermicompost compared to control, CGR increased by 26.8%. The same results were recorded for isoleucine, lysine, phenylalanine, threonine, and tryptophan. A positive response regarding growth characteristics and amino acids in quinoa seeds was recorded following the application of vermicompost. Under severe drought stress, the application of GABA had a significant effect in reducing malondialdehyde content (15.6%), which is used as a marker to determine the amount of oxidative damage to lipids and the membrane damage. Based on the combined application of vermicomposting and GABA, the highest concentrations of isoleucine (5.25 mg. l^{-1}), lysine (6.20 mg. l^{-1}), methionine (2.19 mg. l^{-1}), and phenylalanine (3.21 mg. l^{-1}) were obtained when 5 t. ha^{-1} vermicompost + 10 mg. l^{-1} GABA were tested.

Conclusion

In general, the use of GABA alone or in combination with vermicompost effectively decreased the adverse effects of drought stress on lipid metabolism and amino acid accumulation. According to the results, it is recommended the applying 5 t. ha^{-1} vermicompost + 10 mg. l^{-1} GABA to improve quinoa resistance to water stress, especially under arid and semi-arid areas. Having this in mind, the widespread use of organic fertilizers can be considered as one of the essential areas in applied scientific research on sustainable agriculture development. Drought stress is also related to the plant nutrition, and a reduction in availability and various nutrients uptake for the plant is considered as one of the most important negative effects of drought stress. Therefore, using of natural fertilizers with biological origin has great importance in maintaining the structure, biological activity, exchange and water holding capacity and finally, in modifying the physical and chemical structure of soil.

Keywords: Isoleucine, Malondialdehyde, Plant water requirement, Tryptophan

تولیدات گیاهی، ۱٤۰٤، ٤۸(٤)، ٥٤۷ – ٥٦٦
https://plantproduction.scu.ac.ir/
ISSN (P): 2588-543X; **ISSN (E):** 2588-5979
Doi: 10.22055/ppd.2025.47985.2207
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲ /۲۷

تولیدات گیاهی
مقاله پژوهشی

ارزیابی اثر سطوح مختلف ورمی‌کمپوست و گاما آمینوبوتیریک اسید بر شاخص‌های رشدی و عملکرد دانهٔ کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) تحت سطوح تنش خشکی

مهدی جمشید عینی[۱]، محمدعلی بهدانی[۲*]، سهیل پارسا[۳]، سرور خرم دل[٤]

۱- دانش‌آموختهٔ دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، بیرجند، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، بیرجند، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، بیرجند، ایران
۴- دانشیار، گروه اگروتکنولوژی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

تنش‌های ناشی از کمبود آب و محدودیت عناصر غذایی، به ویژه در شرایط خشک و نیمه‌خشک، پیامدهای شدیدی بر عملکرد محصول دارند. بنابراین شناسایی و به‌کارگیری راهکارهای نوین جهت افزایش تحمل گیاهان در برابر عوامل تنش‌زا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گیاه کینوا تحمل زیادی در برابر تنش‌های خشکی و شوری دارد و به خوبی قابلیت رشد در خاک‌های فقیر را دارد. تحمل بالای این گیاه به تنش‌های شوری و خشکی موجب شده است که این گیاه سازگاری بالایی به شرایط مختلف اقلیمی داشته باشد. بنابراین می‌توان از کینوا به‌عنوان گیاهی مناسب برای ارتقای امنیت غذایی و دستیابی به کشاورزی پایدار استفاده کرد. مطالعهٔ حاضر طی سال زراعی ۱۳۹۸ در دو مزرعهٔ تحقیقاتی دانشگاه بیرجند و دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش‌ها به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. در این پژوهش، رژیم‌های آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی) به عنوان کرت اصلی و ترکیب تیماری ورمی کمپوست (صفر و ۵ تن در هکتار) × سطوح گابا (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در لیتر) به‌عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شدند. شاخص-های رشدی در شش مرحله اندازه‌گیری و در مراحل گلدهی کامل و رسیدگی فیزیولوژیکی به‌ترتیب محتوای مالون‌دی آلدهید، عملکرد دانه و محتوای اسیدهای آمینه بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی باعث کاهش ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و سرعت رشد نسبی شد. سرعت رشد محصول در بیرجند در شرایط تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه با افزایش ۲۶/۷ درصدی نسبت به تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه ثبت شد. با این وجود کاربرد گابا و ورمی کمپوست بر صفات مذکور اثر معنی‌داری داشت. نتایج مشابهی نیز برای ایزولوسین، لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تریپتوفان ثبت شد. واکنش مثبت در خصوص ویژگی-های رشدی و اسیدهای آمینه در دانه کینوا پس از استفاده از ورمی کمپوست مشاهده شد. در شرایط تنش خشکی شدید، کاربرد گابا اثر قابل توجهی بر کاهش محتوای مالون دی آلدهید (۱۵/۶ درصد) داشت. به دنبال کاربرد تلفیقی ورمی کمپوست و گابا، بالاترین محتوای ایزولوسین (۵/۲۵ گرم در ۱۰۰ گرم)، لیزین (۶/۲۹ گرم در ۱۰۰

* **نویسنده مسئول:** محمدعلی بهدانی
رایانامه: mabehdani@birjand.ac.ir

گرم)، متیونین (۲/۱۹ گرم در ۱۰۰ گرم) و فنیل آلانین (۳/۲۱ گرم در ۱۰۰ گرم) زمانی به‌دست آمدند که ۵ تن ورمی کمپوست در هکتار به همراه ۱۰ میلی گرم بر لیتر گابا مورد استفاده قرار گرفت. در شرایط تنش خشکی، استفاده از گابا به تنهایی یا در ترکیب با ورمی کمپوست به طور معنی‌داری اثرات نامطلوب تنش خشکی بر متابولیسم لیپیدها و تجمع اسیدهای آمینه را کاهش داد. بر اساس نتایج می‌توان بیان نمود که گیاه کینوا با تحریک تجمع اسیدهای آمینه، تحمل خود را نسبت به تنش خشکی افزایش می‌دهد. بنابراین، استفادهٔ همزمان از ۵ تن در هکتار ورمی کمپوست و۱۰ میلی‌گرم بر لیتر گابا برای بهبود عملکرد کینوا در برابر تنش آبی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک توصیه می‌گردد.

کلید واژه‌ها: ایزولوسین، تریپتوفان، مالون دی آلدهید، نیاز آبی گیاه

مقدمه

امروزه سه گیاه گندم، برنج و ذرت تأمین‌کننده حدود ۶۰ درصد کالری و ۵۶ درصد پروتئین مورد نیاز انسان می‌باشند، که این محدودیت موجب آسیب‌پذیری به بخش کشاورزی، کاهش تنوع و پایداری کشاورزی و ضعف رژیم غذایی بشر می‌گردد (Qadir *et al.*, 2019). سطح زیر کشت کینوا در ایران حدود ۳۲۰ هکتار بوده و در بین استان های کشور، کرمان با وسعتی معادل ۱۰۰ هکتار، بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. در راستای پایداری و اطمینان از تأمین نیازهای غذایی بشر، ضروری است نظام‌های کشاورزی از طریق افزایش کشت و کار گونه‌های زراعی جدید و یا گیاهان فراموش شده در الگوهای مختلف کشت، زمینه را برای افزایش ثبات تولید و تأمین امنیت غذایی بشر فراهم سازد (Qadir *et al.*, 2019).

کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd)، گیاهی دو لپه و یک ساله از زیرخانوادهٔ Chenopodiacese و خانوادهٔ Amaranthaceae می‌باشد. این گیاه بومی بولیوی، پرو و شیلی است که قدمت آن به بیش از ۵۰۰۰ سال می‌رسد (Ahmadi *et al.*, 2019). این گیاه می تواند بر پایهٔ ساختار غذایی خود، نیازهای ضروری بدن را تأمین می‌کند. دانهٔ کینوا منبع غنی از پروتئین، آنتی-اکسیدان، منگنز، آهن، پتاسیم، مس، روی، فسفر و ویتامین‌های گروه ب از جمله ریبوفلاوین، تیامین و نیاسین است و مقدار پروتیئن بیشتر و باکیفیت‌تری نسبت به اکثر غلات نظیر گندم داشته و می‌تواند در تغذیهٔ انسان مورد استفاده قرارگیرد (Adel, 2020). کینوا با وجود برخورداری از ارزش غذایی بالا در شرایطی که اراضی دارای حاصلخیزی کم و محدودیت محیطی باشند، به خوبی قابل کشت بوده (Ahmadi *et al.*, 2019) و مقاومت زیادی در برابر تنش‌های غیرزیستی به ویژه تنش‌های خشکی و شوری داشته و به خوبی قابلیت رشد در خاک‌های فقیر را دارد (Miranda-Apodaca *et al.*, 2018). تحمل بالای این گیاه به تنش‌های شوری و خشکی موجب شده است که این گیاه سازگاری بالایی به شرایط مختلف اقلیمی داشته باشد (Bhagava *et al.*, 2006). بنابراین می‌توان از کینوا به‌عنوان گیاهی مناسب برای ارتقای امنیت غذایی و دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار استفاده کرد (Ahmadi *et al.*, 2019).

از آن‌جایی که کشاورزی کنونی با چالش‌های فراوانی از جمله کاهش زمین‌های زراعی، کمبود مواد آلی خاک، محدودیت منابع آب آبیاری و افزایش بیش از حد مصرف کودهای شیمیایی مواجه است، یافتن سیستم‌های کشاورزی پایدار به یکی از اولویت ها و دغدغه‌های اصلی متخصصان کشاورزی تبدیل شده است. به‌طور کلی مناطق خشک و نیمه خشک که با کمبود آب مواجه هستند، از نظر محتوای مواد آلی خاک نیز فقیر هستند. بنابراین ارزیابی سیستم‌های مختلف تغذیهٔ گیاه (مدیریت مصرف کودهای شیمیایی و آلی)

در این مناطق برای حفاظت از محیط زیست، کاهش فرسایش، بهینه کردن مصرف آب و دستیابی به عملکرد مطلوب، یک ضرورت اساسی می‌باشد (Ahmed *et al*., 2021; Ahluwalia *et al*., 2021; Cohen *et al*., 2021; Lotfi *et al*., 2022). کودهای آلی باعث تغذیه و رشد و نمو موجودات زنده خاک، بهبود ساختمان فیزیکی خاک و همچنین جلوگیری از فرسایش آن می‌شوند. ورمی کمپوست یکی از انواع کودهای آلی است که در واقع یک راه مؤثر برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک است و به عنوان اصلاح کنندهٔ آلی خاک در بهبود ویژگی‌های کمی و کیفی گیاهان نیز مؤثر است (Adel, 2020). این کود آلی دارای ویژگی‌های مفیدی مانند تخلخل زیاد، قدرت جذب و نگهداری رطوبت، تهویه و زهکشی مناسب و سطح جذب زیاد برای آب و مواد غذایی می‌باشد (Mukherjee *et al*., 2014). کاربرد ورمی کمپوست یک رویکرد ویژه برای مقابله با کمبود مواد آلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در نظر گرفته می‌شود. ورمی کمپوست حاوی سطح کارآمدی از مواد مغذی است که به تدریج در طول فصل رشد در دسترس گیاه قرار می گیرد (Barova *et al*., 2013).

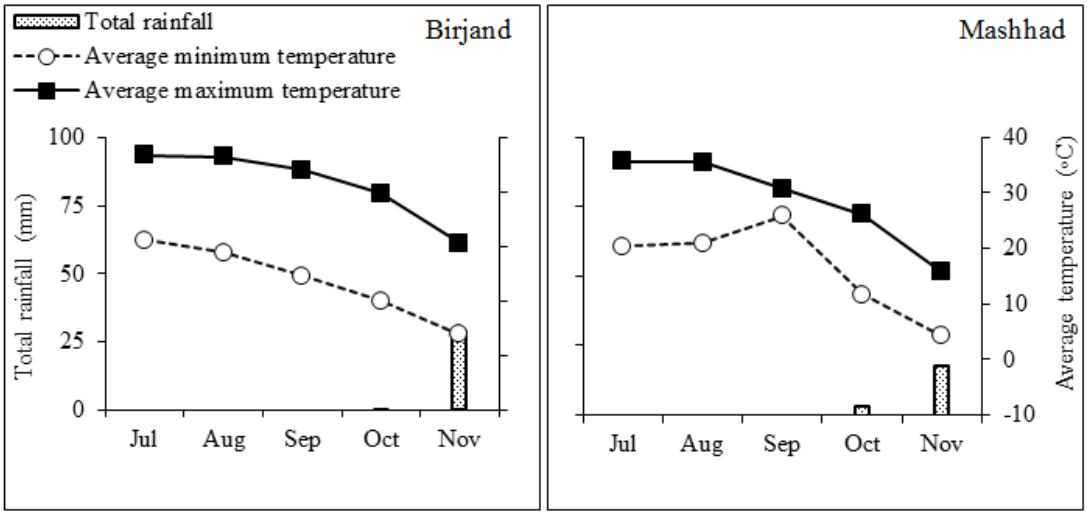
علاوه بر تأمین اصلاح‌کننده‌های آلی، استفاده از ترکیبات سیگنال‌دهی گیاه به‌عنوان محرک‌های خارجی می‌تواند نقش مؤثری در مقابله با تنش‌های محیطی داشته باشد (Nayar *et al*., 2014). در این راستا، گاما آمینوبوتیریک اسید (به اختصار گابا) یکی از تنظیم-کننده‌های داخلی گیاه است که تحمل در برابر تنش‌های محیطی را تحریک می‌کند (Wu *et al*., 2020). گابا به عنوان یک مولکول سیگنال‌دهی کوچک شناخته شده است که به سرعت در سلول‌های گیاهی دچار تنش محیطی، تجمع می‌یابد و به دنبال آن، متابولیسم ژن و مسیرهای آنتی‌اکسیدانی را القا می‌کند (Dabravolski and Isayenkov, 2023). به طور کلی، گابا یک تیمار مقرون به صرفه و پایدار است که می‌تواند به عنوان پرایمینگ قبل از کاشت یا محلول‌پاشی در طی مراحل رویشی و زایشی گیاه استفاده شود (Feng *et al*., 2020). ژو و همکاران (Xu *et al*., 2021) گزارش کردند که کاربرد گابا در گیاهان زراعی مانند گندم و ذرت تحت تنش خشکی به تعدیل هدایت روزنه‌ای، محافظت از فتوسیستم II، تحریک بیوسنتز موم برگ، تحریک سنتز اسیدهای چرب و ارتقای کارایی مصرف آب منجر می شود.

علیرغم اهمیت بالای گیاه کینوا و علیرغم اهمیت ورمی کمپوست و گابا در افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، تاکنون کاربرد همزمان ورمی کمپوست و گابا از نظر واکنش کینوا مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی همزمان کاربرد ورمی کمپوست و گابا بر شاخص‌های رشدی و کیفیت اسیدهای آمینه در شرایط سطوح مختلف نیاز آبی گیاه کینوا انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۸ در دو ایستگاه آزمایشی واقع در بیرجند (دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه بیرجند با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا) و مشهد (دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) انجام شد.

مکان‌های مورد آزمایش در اقلیم نیمه‌خشک واقع شده‌اند. آمار هواشناسی مکان‌های انجام آزمایشات در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- اطلاعات مربوط به بارندگی و دما در طی فصل رشد در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 1. The information regarding rainfall and temperature during the growing season in Birjand and Mashhad regions

هر دو آزمایش به صورت اسپلیت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل تأمین ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بودند که با استفاده از آب چاه موجود در مزرعه اعمال شده و به‌عنوان کرت اصلی در نظر گرفته شدند. کرت فرعی نیز شامل سطوح مختلف ورمی‌کمپوست (صفر و ۵ تن در هکتار) و اسید ۷- آمینوبوتیریک (گابا) (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر) به‌صورت فاکتوریل در نظر گرفته شد. نتایج آنالیز شیمیایی نشان داد که ورمی کمپوست (تولید شده توسط گروه تولیدی آرتا ایران) شامل ۱/۴۵ درصد نیتروژن ، ۱/۱۶ درصد فسفر، ۱/۲ درصد پتاسیم و ۱۸/۶۵ درصد مواد آلی و شوری معادل ۲۸ دسی زیمنس بر متر بود. اعمال ورمی کمپوست پیش از کاشت و همزمان با اعمال کرت‌های آزمایشی به صورت پاشش یکنواخت در سطح خاک انجام شد. همچنین گابا (تهیه شده از شرکت Sigma-Aldrich) در دو نوبت مرحلهٔ ۴-۶ برگی و ۱۰-۱۲ برگی بر اساس یک بیش آزمایش) صورت گرفت.

عملیات زراعی در هر دو منطقه به‌طور مشابه انجام شد. قبل از تهیه بستر بذر نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک انجام شد (جدول ۱). پس از آماده-سازی بستر کشت (شامل شخم عمیق، دوبار دیسک عمود برهم و تسطیح)، کرت‌ها با طول پنج متر و عرض سه متر ایجاد شدند. سه کرت اصلی و ۱۸ کرت فرعی در هر بلوک طراحی شده که به ترتیب نیم و دو متر فاصله بین کرت‌ها و بلوک‌ها در نظر گرفته شد. بذور رقم Titicaca (تهیه شده از مرکز تحقیقات شوری یزد) به ترتیب در۲۶ و ۲۹ تیر ۱۳۹۸ (به ترتیب ۲۰ و ۱۷ جولای ۲۰۱۹) در مشهد و بیرجند کاشته شدند. تعداد ردیف در هر کرت معادل ۶ و فواصل بین ردیف ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین عمق کاشت معادل دو سانتی متر و تراکم نهایی معادل ۶۰ بوته در مترمربع تعیین شد. کشت در طرفین پشته ها انجام شد. بر اساس شرایط آب و هوایی در هر دو مکان، نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم افزار CROPWAT (FAO, 1992) محاسبه شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت (یک روز) و آبیاری دوم، سه روز بعد انجام شد. سایر آبیاری‌ها از زمان استقرار براساس تیمارهای آبیاری اجرا شد. در تیمار شاهد تعداد کل آبیاری‌ها تقریباً به صورت هفتگی معادل ۱۱ مرحله انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک آزمون شده در دو منطقهٔ بیرجند و مشهد

Table 1. Some chemical and physical traits of experimental soil in Birjan and Mashhad regions

Experimental sites	Clay	Silt	Sand	Organic C	N	P	K	PH	EC (dS. m^{-1})
	%					mg kg^{-1}			
Birjand	18	12	70	0.16	0.031	11.75	225.3	7.80	4.58
Mashhad	44	32	24	0.48	0.080	6.71	181.5	8.34	1.16

بافت خاک دو منطقه به ترتیب سیلت، لوم و شن

Soil texture of the two regions is silt, loam and clay respectively

در مرحلهٔ حداکثر گلدهی، محتوای مالون‌دی آلدهید با نمونه‌برداری از برگ‌های تازه به روش Heath and Parker (1968) اندازه‌گیری شد. در طول فصل رشد، با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای (۲۵ سانتی‌متر در ابتدا و انتهای کرت‌ها و دو ردیف جانبی)، شاخص‌های رشدی گیاه (شامل ارتفاع بوته، سرعت رشد محصول، سرعت رشد نسبی و سرعت آسیمیلاسیون خالص) تعیین شد. به این منظور، شش بوته به طور تصادفی انتخاب شدند و اندازه گیری در شش مرحله انجام گردید (بیرجند: ۸ مرداد، ۲۲ مرداد، ۵ شهریور، ۱۹ شهریور، ۳ مهر و ۲۶ مهر مصادف با ۳۰ جولای، ۱۳ آگوست، ۲۷ آگوست، ۱۰ سپتامبر، ۲۵ سپتامبر و ۱۸ اکتبر و مشهد: ۱۲ مرداد، ۲۶ مرداد، ۹ شهریور، ۲۳ شهریور، ۷ مهر و ۲۱ مهر مصادف با ۳ آگوست، ۱۷ آگوست، ۳۱ آگوست، ۱۴ سپتامبر، ۲۹ سپتامبر و ۱۳ اکتبر ۲۰۱۹). در مرحلهٔ رسیدگی کامل (۲۶ مهرماه در بیرجند و ۲۱ مهرماه در مشهد مصادف با ۱۸ و ۱۳ اکتبر)، عملکرد دانه با برداشت بوته‌های بخش مرکزی هر کرت (معادل ۱۱/۲۵ متر مربع) اندازه‌گیری شد و سپس محتوای اسیدهای آمینه بذر طبق روش روی و همکاران (Rui *et al*, 2018) اندازه‌گیری شد.

جهت اندازه‌گیری سرعت رشد محصول (CGR)، سرعت رشد نسبی (RGR) و سرعت آسیمیلاسیون خالص (NAR) به ترتیب از معادله های زیر استفاده شد:

سرعت رشد محصول (CGR): W_1 و W_2 به ترتیب وزن خشک هر نمونه در زمانهای t_1 و t_2 می‌باشد.

رابطهٔ ۱ $$CGR= (W_2-W1) / (t_2-t_1)$$

سرعت رشد نسبی (RGR): W_1 و W_2 به ترتیب وزن خشک کل هر نمونه در زمان‌های t_1 و t_2 می‌باشد.

سرعت آسیمیلاسیون خالص (NAR):

رابطهٔ ۲ $$NAR= CGR/LAI$$

درجه روز–رشد :

رابطهٔ ۳ $$GDD=\sum_{di}^{dn}\left(\frac{T\max+T\min}{2}-Tb\right)$$

GDD: درجه روز رشد، Tmax: نشان‌دهندهٔ درجه حرارت‌های حداکثر روزانه، Tmin: بیانگر درجه حرارت‌های حداقل روزانه، di: روز اول پس از کاشت گیاه، dn: روز n ام پس از کاشت گیاه، و Tb: درجه حرارت پایه به میزان چهار درجه سانتی‌گراد.

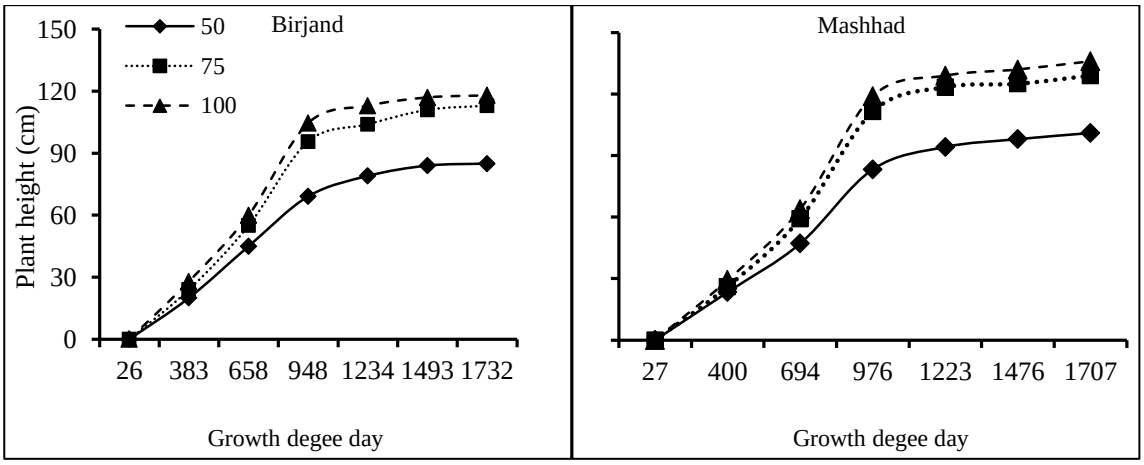
جهت اندازه گیری سطح برگ در منطقه مشهد وبیرجند از دستگاه سطح سنج برگ (مدل CI 202) استفاده شد.

داده‌های حاصل توسط نرم افزار SAS 9.4 آنالیز شدند. به منظور تجزیه مرکب داده‌ها، ابتدا جهت سنجش واریانس خطای آزمایشی به لحاظ همگن بودن از آزمون بارتلت استفاده گردید. سپس مقایسه میانگین بر اساس حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد انجام شد. ترسیم نمودارها نیز با نرم افزار Excel صورت گرفت.

نتایج و بحث

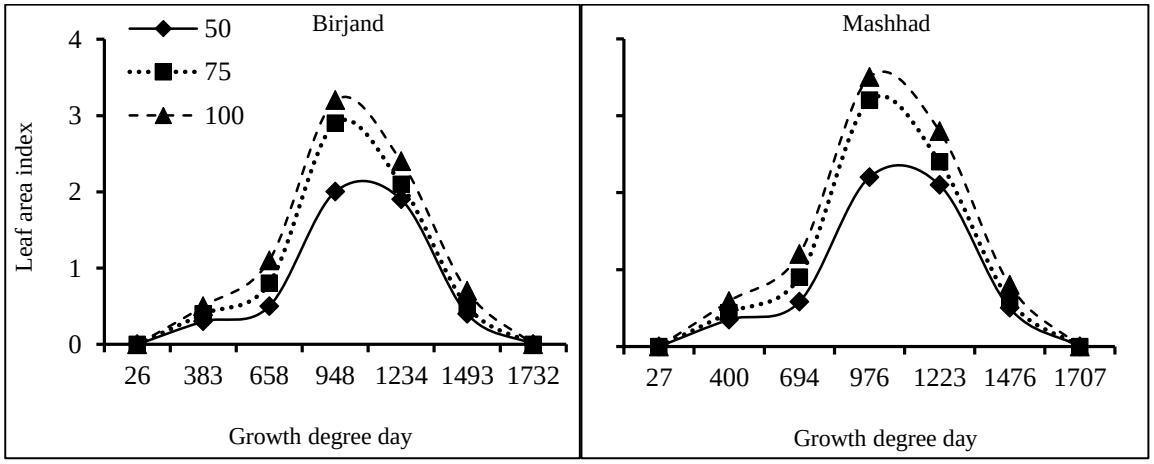
ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ

طبق نمودار روند تغییرات ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ در نتیجه افزایش شدت تنش خشکی کاهشی بوده و این کاهش در مشهد نسبت به بیرجند مشهودتر بود. (شکل‌های ۲ و ۳). همچنین روند تغییرات شاخص سطح برگ تا مرحلهٔ چهارم نمونه برداری (مرحلهٔ حداکثر گلدهی) افزایشی بود و سپس با کاهش نسبتاً شدیدی مواجه شد (شکل ۳). چنین روندی بیانگر ماهیت رشد محدود بودن گیاه کینوا می‌باشد که پس از ظهور گل‌آذین گیاه، انتقال مواد فتوسنتزی به سمت دانه‌های در حال رشد رفته و تا زمان تکمیل آن‌ها ادامه می‌یابد. حداکثر میزان شاخص سطح برگ در نتیجه افزایش شدت تنش خشکی از ۱۰۰ به ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه با کاهش قابل ملاحظه‌ای مواجه شد.



شکل ۲- تغییرات ارتفاع گیاه در فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف تنش خشکی در مناطق بیرجند و مشهد

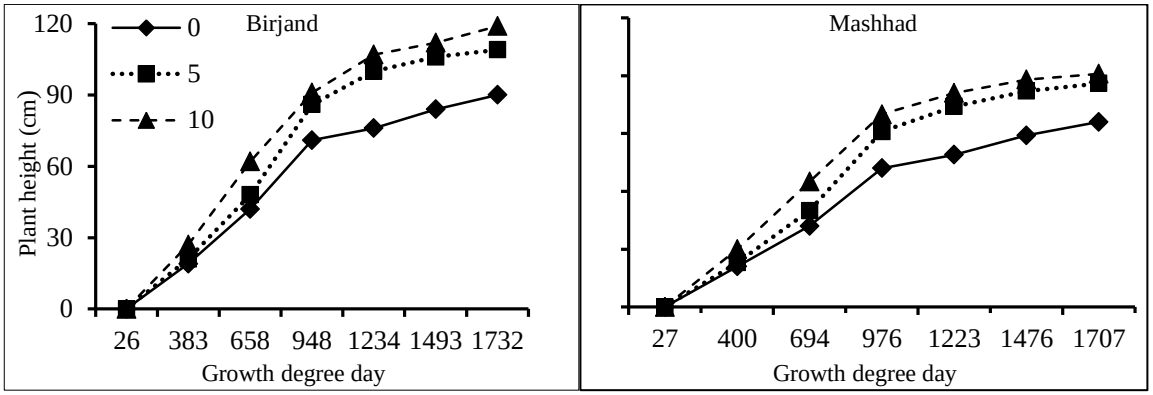
Figure 2. Plant height changes during the growing season in quinoa under different drought stress levels in Birjand and Mashhad regions



شکل ۳- تغییرات شاخص سطح برگ در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف تنش خشکی در مناطق بیرجند و مشهد

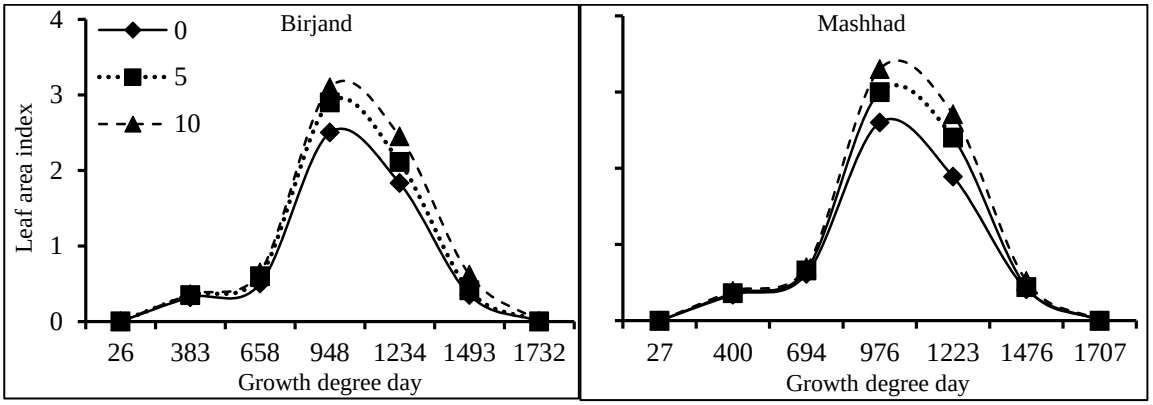
Figure 3. Leaf area index changes during the growing season in quinoa under different drought stress levels in Birjand and Mashhad regions

همچنین نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که کاربرد گابا در هر دو منطقه نقش مؤثری در افزایش ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ داشت. به‌طوری که شاخص سطح برگ در هر دو منطقه بیرجند و مشهد در واکنش به سطوح گابا به طور مؤثر بهبود یافت. (شکل-های ۴ و ۵). این امر نشان می‌دهد که مصرف گابا با فراهمی مناسب عناصر غذایی و تعدیل شاخص‌های فیزیولوژیک یا تحت تنش می‌تواند در تنظیم رفتارهای رشدی گیاه نقش مؤثری ایفا نماید؛ به‌طوری که هر چه میزان مصرف آن از طریق محلول‌پاشی افزایش یابد، سطح مؤثر بودن آن نیز با افزایش همراه است. نتایج یانگ و همکاران (Yong *et al*, 2017) نیز حاکی از آن بود که تحت شرایط تنش خشکی حاصل از پلی‌اتیلن گلایکول، محلول‌پاشی گابا وضعیت رشدی برگ‌ها را از طریق کاهش سرعت پیری در شبدر سفید بهبود بخشید. همان‌طور که نتایج نشان در واقع نتایج نشان داد که مصرف ورمی‌کمپوست در سطح پنج تن در هکتار در مقایسه با عدم مصرف آن، سبب افزایش ارتفاع و شاخص سطح برگ کینوا در اقلیم‌های بیرجند (۲۱ و ۳۵/۶ درصد به ترتیب) و مشهد (به ترتیب ۲۱/۵ و ۳۱/۱ درصد) گردید (شکل‌های ۶ و ۷).



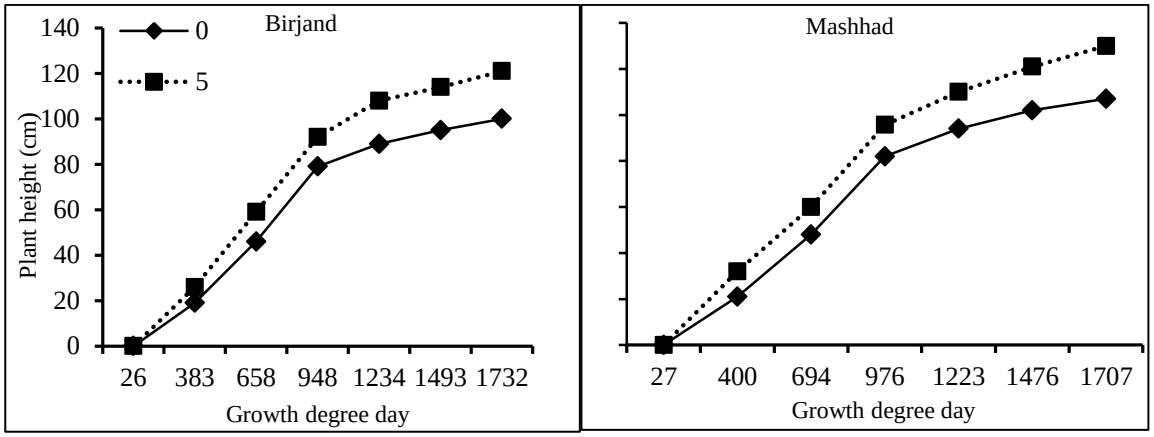
شکل٤- تغییرات ارتفاع گیاه در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف GABA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 4. Plant height changes during the growing season in quinoa under different GABA levels (mg. kg^{-1}) in Birjand and Mashhad regions



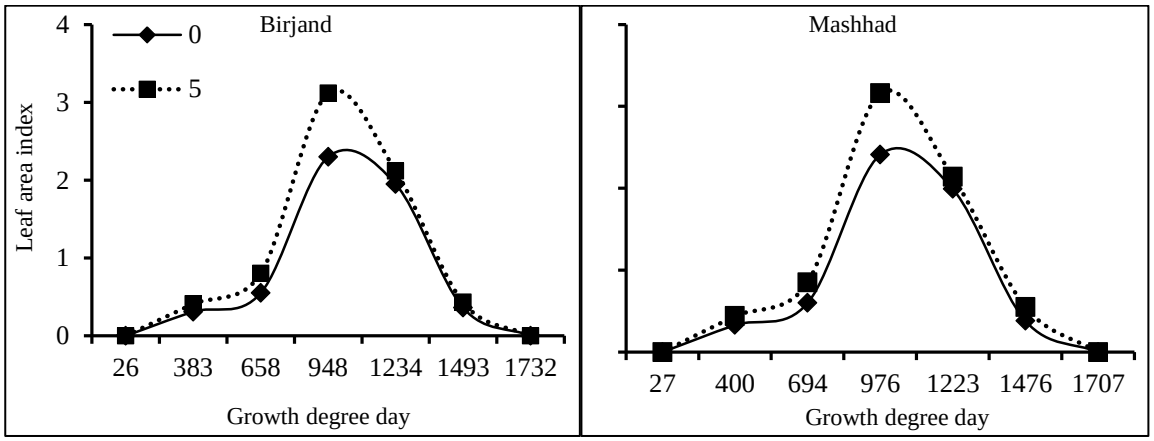
شکل٥- تغییرات شاخص سطح برگ در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف GABA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 5. Leaf area index changes during the growing season in quinoa under different GABA levels (mg. kg^{-1}) in Birjand and Mashhad regions



شکل ٦- تغییرات ارتفاع گیاه درطی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف ورمی‌کمپوست (تن در هکتار) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 6. Plant height changes during the growing season in quinoa under different vermicompost levels (t. ha^{-1}) in Birjand and Mashhad regions



شکل ۷- تغییرات شاخص سطح برگ در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف ورمی‌کمپوست (تن در هکتار) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 7. Leaf area index changes during the growing season in quinoa under different vermicompost levels (t. ha^{-1}) in Birjand and Mashhad regions

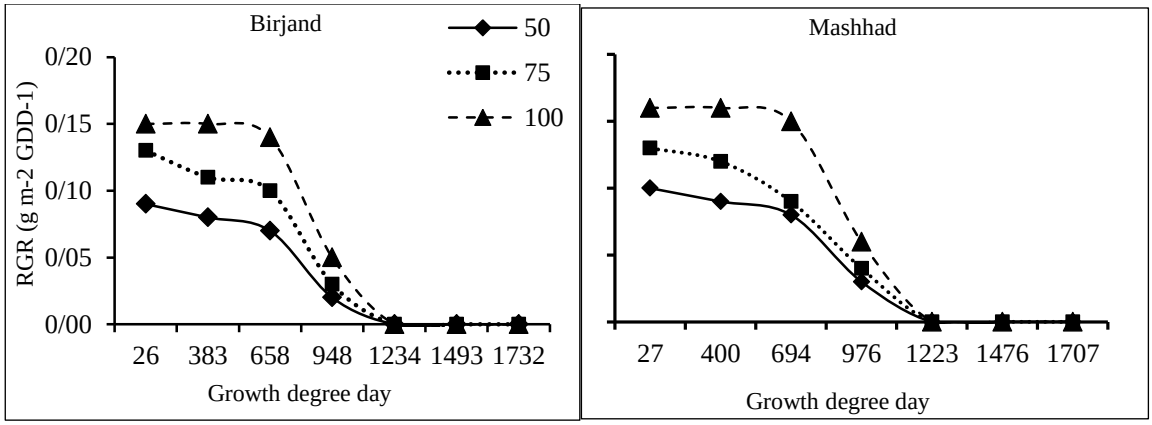
.

سرعت رشد نسبی

روند سرعت رشد نسبی در مناطق مورد مطالعه مشهد و بیرجند در نتیجه افزایش تنش خشکی با کاهش مواجه شد (شکل ۸). این نتایج نشان می‌دهد که رفتار رشدی گیاه کینوا به‌شدت تابعی از فراهمی آب می‌باشد، به‌طوری که هرگونه اختلال در تأمین نیاز آبی گیاه می‌تواند شاخص‌های ذکر شده را با کاهش مواجه نماید. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد گابا نقش مؤثری در افزایش سرعت رشد نسبی گیاه کینوا داشت (شکل۹). همچنین مصرف ورمی کمپوست منجر به بهبود سرعت رشد نسبی شد، به‌طوری که در منطقه مشهد و در مرحلهٔ رشد رویشی، سرعت رشد نسبی پس از کاربرد ۵ تن ورمی‌کمپوست در هکتار نسبت به شاهد، ۲۶/۸ درصد افزایش یافت (شکل ۱۰). در این آزمایش تنش خشکی منجر به کاهش شاخص‌های رشدی از جمله ارتفاع بوته، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول و سرعت رشد نسبی گردید. در همین راستا سان و همکاران (Sun *et al.*, 2014) گزارش کردند که کاهش شاخص سطح برگ گیاه کینوا در شرایط تنش را می‌توان به کاهش رشد طولی، کاهش تعداد شاخه‌های جانبی و ریزش برگ‌های پایینی نسبت داد. همان طور که در نتایج حاصل از این آزمایش نیز قابل مشاهده می‌باشد کاربرد

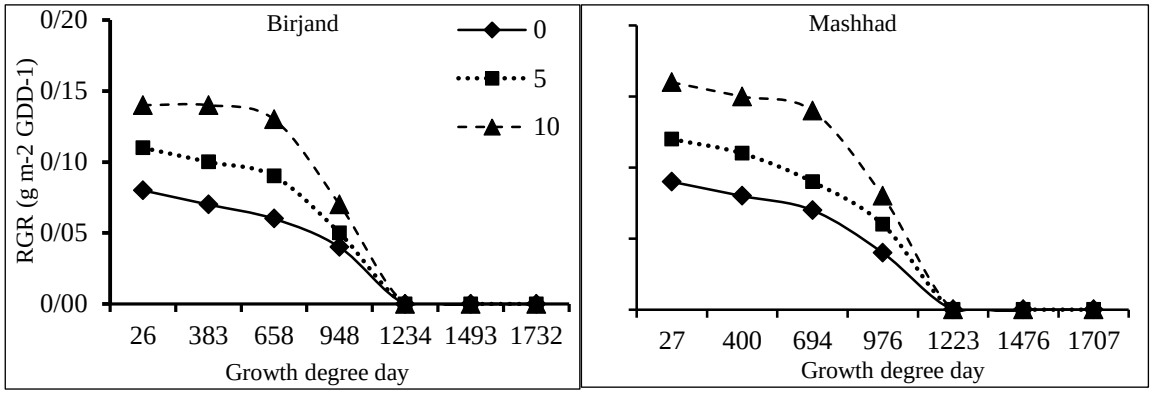
کودهای آلی از جمله ورمی کمپوست می‌تواند اثرات تنش خشکی را تعدیل کند. هم راستا با نتایج این آزمایش هاکان (Hakan, 2002) گزارش کرد که کاربرد کودهای آلی از طریق کاهش شدت تنش، بهبود رشد شاخساره و تحریک تولید شاخه‌های جانبی سبب افزایش شاخص سطح برگ می‌شود. به نظر می‌رسد علت کاهش سرعت رشد محصول در شرایط تنش خشکی کاهش سطح و تعداد برگ، اختلال در فتوسنتز و کاهش تولید ماده خشک باشد.

گابا به عنوان یک تنظیم کنندهٔ سلولی می‌تواند سازوکار رشد گیاه را که توسط تنش‌های محیطی تحمیل شده است تحریک کند (Hasan *et al*., 2021). این سازوکار خودکنترلی می‌تواند به طور ویژه پس از اعمال تنش خشکی مورد توجه قرار گیرد (Yuan *et al*., 2023). بنابراین، نقش مؤثر گابا در بهبود سرعت رشد محصول و سرعت رشد نسبی گیاه کینوا می‌تواند به دلیل نقش مؤثر آن در افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باشد. بنابراین، در واکنش به مصرف گابا، کینوا ممکن است عملکرد بالاتری از نظر در دسترس بودن مواد مغذی داشته باشد که این منجر به بهبود رشد و عملکرد محصول گردید. اثر مثبت ورمی کمپوست بر بهبود رشد گیاهان به ویژه در شرایط تنش خشکی از جنبه‌های مختلف قابل بررسی است. گیاه پس از استفاده از ورمی کمپوست توانایی بالاتری در جذب عناصر غذایی در خاک دارد. ورمی کمپوست یکی از کودهای آلی است که دارای طیف متعادلی از ریز مغذی‌ها و درشت مغذی‌ها می‌باشد. احتمالاً گیاهان تیمار شده با ورمی کمپوست نسبت به گیاهان شاهد از طریق حلالیت بیشتر مواد مغذی، تحمل بهتری نسبت به تنش خشکی دارند. بر اساس نتایج مشابه، استفاده از ورمی کمپوست منجر به افزایش وزن خشک برگ و ساقه و محتوای عناصر معدنی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منیزیم نسبت به شاهد شد (Bellitürk *et al*., 2023).



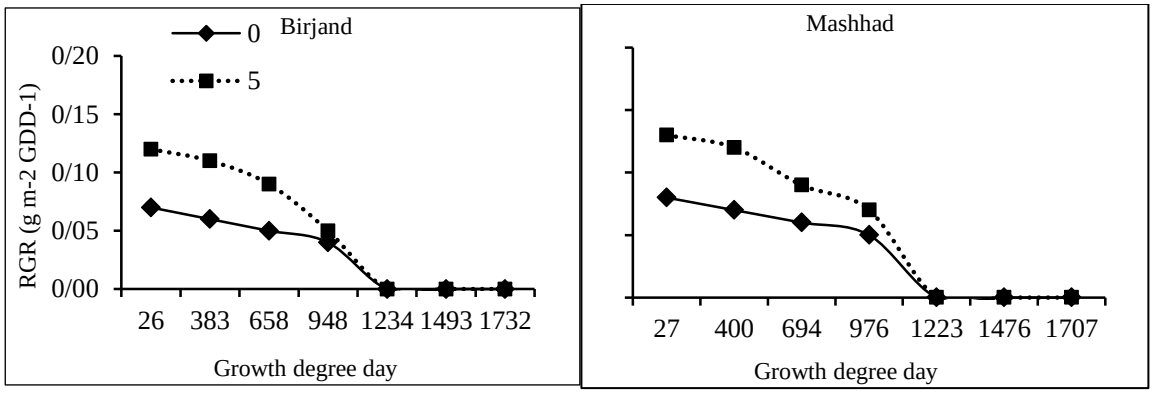
شکل ۸- تغییرات سرعت رشد نسبی در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف تنش خشکی در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 8. Relative growth rate changes during the growing season in quinoa under different drought stress levels in Birjand and Mashhad regions



شکل ۹- تغییرات سرعت رشد نسبی در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف GABA (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 9. Relative growth rate (RGR) changes during the growing season in quinoa under different GABA levels (mg. kg^{-1}) in Birjand and Mashhad regions



شکل ۱۰- تغییرات سرعت رشد نسبی در طی فصل رشد کینوا تحت سطوح مختلف ورمی‌کمپوست (تن در هکتار) در مناطق بیرجند و مشهد

Figure 10. Relative growth rate (RGR) changes during the growing season in quinoa under different vermicompost levels (t. ha^{-1}) in Birjand and Mashhad regions

محتوای مالون دی‌آلدهید

نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان‌دهندهٔ تفاوت معنی‌داری بین مکان‌ها، تیمارهای آبیاری و تیمارهای کودی (گابا و ورمی‌کمپوست) از نظر محتوای مالون دی‌آلدهید بود. بر هم‌کنش بین آبیاری و گابا و بین آبیاری و ورمی کمپوست بر محتوای مالون‌دی‌آلدهید نیز معنی‌دار بود (جدول ۲). در تیمار عدم کاربرد کاربرد گابا، شدت تنش خشکی منجر به افزایش محتوای مالون دی‌آلدهید شد. در شرایط عدم کاربرد گابا و تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه محتوای مالون‌دی‌آلدهید ۱۲/۶ درصد در مقایسه با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه افزایش یافت (جدول ۳). در شرایط تنش شدید، کاربرد گابا اثر قابل توجهی در کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید داشت. در واقع، گابا نقش جبرانی در کاهش مالون دی‌آلدهید تحت تنش خشکی ایفا کرد. به عنوان مثال، پس از تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، کاربرد ۱۰ میلی گرم در لیتر گابا نسبت به عدم کاربرد آن، منجر به کاهش ۱۵/۶درصدی مالون‌دی آلدهید شد. ورمی کمپوست نیز نقش مؤثری در کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید داشت. بطوری که در تیمار تنش خشکی شدید و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، میزان مالون دی‌آلدهید ۴۷/۷ نانومول بر گرم وزن تر ثبت شد؛ در حالی‌که پس از اعمال ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست مقدار این شاخص ۴۵/۸ نانومول بر گرم وزن تر برآورد شد (جدول ۴).

مالون دی آلدهید به عنوان یک نشانگر بیوشیمیایی با وقوع تنش اکسیداتیو مرتبط است که تحت تنش خشکی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Shahid *et al*., 2020). در چنین شرایطی، شدت تنش خشکی همزمان با تنش‌های دیگر، میزان پراکسیداسیون لیپیدی را افزایش می‌دهد و در نتیجه محتوای مالون دی‌آلدهید می‌تواند به طور مخرب افزایش یابد (Kaboosi *et al*., 2023). در این شرایط، کاربرد خارجی موادی مانند گیاه می‌توانند با افزایش تحمل ساختارهای لیپیدی در غشاء، میزان مالون دی-آلدهید را به میزان قابل توجهی کاهش دهند (Hanif *et al*., 2021). همانطور که بیان شد، ورمی کمپوست می-تواند با تأمین مواد مغذی گیاهان، تحمل سلولی را در برابر تنش‌های محیطی بهبود بخشد و در نتیجه نقش مؤثری در کاهش القای تنش اکسیداتیو در نتیجه تنش خشکی ایفا کند (Ghaffari *et al*., 2022). بنابراین، کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید در نتیجه کاربرد توام ورمی کمپوست و گیاه را می‌توان در رابطه با بهبود صفات رشد تحت کاهش دسترسی به آب توجیه نمود. در تأیید نتایج این آزمایش، میزان تولید مالون دی‌آلدهید در گیاهچه‌های گندم تحت تنش خشکی افزایش یافت (Ghaffari *et al*., 2022).

محتوای اسیدهای آمینه

به جز متیونین و والین، سایر اسیدهای آمینه (ایزولوسین، لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تریپتوفان) به-طور قابل توجهی تحت بر هم‌کنش آبیاری و گیاه قرار گرفتند (جدول ۲). صرف نظر از تیمارهای آبیاری، اسیدهای آمینه مذکور، واکنش مثبتی به کاربرد گیاه نشان دادند (جدول ۳). همچنین با افزایش شدت تنش خشکی روند افزایشی در مقادیر اسیدهای آمینه نیز ثبت گردید (جدول ۳). در شرایط عدم کاربرد گیاه، محتوای ایزولوسین درشرایط ۱۰۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه به میزان ۶/۳ درصد در مقایسه با ۵۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه کاهش یافت. به طور مشابه، کاهش برای لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تریپتوفان به ترتیب ۵/۰، ۹/۱، ۱۹/۱ و ۳۶/۶ درصد ثبت شد (جدول ۳). تحت تنش شدید، افزایش سطح گیاه از صفر به ۱۰ میلی گرم در لیتر منجر به افزایش محتوای ایزولوسین تا ۳/۴ درصد شد (جدول ۴). در شرایط عدم کاربرد ورمی کمپوست، تشدید تنش خشکی منجر به افزایش محتوای لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تریپتوفان شد (جدول ۴). صرف نظر از سطوح آبیاری، ورمی کمپوست بر افزایش اسیدهای آمینه ذکر شده اثر معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار لیزین (۶/۲۹ گرم در ۱۰۰ گرم) در شرایط تنش شدید با ۵ تن در هکتار ورمی کمپوست به‌دست آمد؛ در حالی‌که کمترین میزان آن تحت تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی و عدم کاربرد ورمی کمپوست (۵/۷۱ گرم در ۱۰۰ گرم) مشاهده گردید (جدول ۴). علاوه بر این تیمار، بر هم کنش ۵۰ درصد نیاز آبی و کاربرد ۵ تن در هکتار ورمی کمپوست میزان لیزین، فنیل آلانین، ترئونین و تریپتوفان را به ترتیب ۰/۱۱، ۰/۲۵، ۰/۱۴ و ۰/۰۳ واحد افزایش داد (جدول ۴). همچنین در شرایط کاربرد تلفیقی ورمی کمپوست و گیاه، بالاترین محتوای ایزولوسین (۵/۲۵ گرم در ۱۰۰ گرم)، لیزین (۶/۲۰ گرم در ۱۰۰ گرم)، متیونین (۲/۱۹ گرم در ۱۰۰ گرم) و فنیل آلانین (۳/۲۱ گرم در ۱۰۰ گرم) زمانی به دست آمد که ۵ تن ورمی کمپوست در هکتار + ۱۰ میلی گرم بر لیتر گیاه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مشابهی برای ترئونین، تریپتوفان و والین به دست آمد (جدول ۵). نتایج نشان داد که با وجود این که گیاه کینوا تحت تنش شدید با کاهش صفات رشدی همراه است، محتوای اسیدهای آمینه با افزایش قابل توجهی مواجه است. چنین واکنشی احتمالاً ناشی از سازوکار خودکنترلی در گیاه است که در شرایط تنش خشکی، تحمل نسبی حاصل می-گردد. در این شرایط، ورمی کمپوست، همراه با بهبود اجزای رشد، می‌تواند با افزایش تجمع اسیدهای آمینه، کیفیت دانه‌های برداشت شده را بهبود بخشد و در نتیجه در تحریک سازوکار مذکور نقش مؤثری ایفا کند. در همین راستا فیض‌آبادی و همکاران (Feizabadi *et al*., 2021) گزارش کردند که کاربرد ۵ تن در هکتار ورمی کمپوست باعث افزایش عملکرد دانه کلزا و بهبود کیفیت

روغن از طریق بهبود اسیدهای چرب غیراشباع شد. به همین ترتیب، بهبود عملکرد دانه و کیفی کلزا نیز از طریق بهبود کیفیت خاک، شاخص‌های رشدی و کیفیت اسیدهای آمینه مشاهده شده است (Khodabin *et al.*, 2022).

عملکرد دانه

نتایج آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که در هر دو اقلیم مشهد و بیرجند اثرات ساده آبیاری، ورمی‌کمپوست وگابا، بر هم‌کنش آبیاری × ورمی‌کمپوست، بر هم‌کنش آبیاری × گابا، بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲) همچنین بر هم‌کنش ورمی‌کمپوست × گابا اثر معنی‌داری بر این شاخص در اقلیم مشهد داشت. نتایج نشان داد که صرف‌نظر از مصرف ورمی‌کمپوست، افزایش شدت تنش منجر به کاهش عملکرد دانه کینوا در دو اقلیم بیرجند و مشهد شد (جدول ۴). با این‌وجود ورمی‌کمپوست نقش مؤثری در تعدیل شدت تنش خشکی در هر دو منطقه بیرجند و مشهد داشت؛ در واقع در اقلیم بیرجند و در شرایط عدم مصرف ورمی‌کمپوست، کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ درصد منجر به کاهش عملکرد دانه شد.

به‌طور کلی بین تیمار تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی در شرایط مصرف پنج تن در هکتار ورمی‌کمپوست با تیمار تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در شرایط عدم مصرف ورمی‌کمپوست تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. روند مشابهی در ارتباط با اقلیم مشهد مشاهده شد. هم‌راستا با نتایج این ازمایش، حبیبی و مجیدیان (Habibi and Majidian, 2014) گزارش کردند که در شرایط تنش کم آبی بر گیاه ذرت شیرین، کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند اجزای عملکرد دانه و کیفیت علوفه‌ای گیاه را بهبود بخشد. ازاین‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط تنش خشکی، کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند عملکرد ناشی از محدودیت نسبی آب (۷۵ درصد) را جبران کند. همچنین نتایج آنالیز واریانس بر هم کنش آبیاری × گابا نشان داد که کمترین میزان عملکرد دانه از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی + عدم مصرف گابا به‌دست آمد (جدول ۳). در هر یک از سطوح آبیاری با افزایش مصرف گابا، عملکرد دانه در هر دو اقلیم بیرجند و مشهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۳).

همچنین یافته های تحقیقاتی نشان داده است که تخلیه رطوبتی خاک تا سطح ۸۰ درصد، منجر به کاهش عملکرد دانه کینوا تا ۳۷ درصد نسبت به شرایط شاهد شد (Beyrami *et al.*, 2024). در همین راستا، لی و همکاران (Li *et al.*, 2010) اظهار داشتند که در گیاه بنت‌گراس در شرایط تنش خشکی کاربرد گابا از طریق بهبود جذب نیتروژن فعالیت فتوسیستم II را ارتقا بخشیده و در نتیجه منجر به تأخیر در روند پیر شدن برگ‌ها گردید. این محققین گابا را یک تنظیم‌کنندهٔ مؤثر پروتئین‌ها و مسیرهای متابولیک تحت تنش خشکی در نظر گرفتند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مصرف گابا می‌تواند کاهش عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی را تا حدودی جبران کند.

ارزیابی همبستگی بین شاخص‌ها

بین شاخص‌های رشدی، ارتفاع بوته و سرعت رشد نسبی همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۵). بین ارتفاع و سرعت رشد محصول همبستگی معادل ۳۸ درصد ($r = 0.38, p < 0.05$) مشاهده گردید. با این حال، همبستگی بین اسیدهای آمینه و شاخص‌های رشدی منفی بود. همچنین همبستگی مثبتی بین اسیدهای آمینه با یکدیگر مشاهده شد به عنوان نمونه، همبستگی بین ایزولوسین با والین و تریپتوفان به ترتیب ۹۴ و ۴۱ درصد بود (شکل ۱۴). با این وجود، با توجه به رابطه منفی بین اسیدهای آمینه و شاخص‌های رشدی، می‌توان یافته نوینی را ثبت کرد. در واقع، گیاهان تحت تنش شدید، همراه با کاهش شاخص‌های رشدی، ممکن است از طریق افزایش تجمع اسیدهای آمینه، سری تحمل‌های خودتنظیمی را القا کنند. چنین شرایطی در شرایط تنش خشکی منجر به تحریک تولید اسیدهای آمینه می شود.

جدول ۲- اثر تیمارهای آزمایشی بر عملکرد دانه و محتوای مالون دی‌آلدهید و اسیدهای آمینه در کینوا

Table 2. Effects of experimental treatments on seed yield, malondialdehyde and amino acid content in quinoa

Experimental treatments	DF	Seed yield (kg .ha^{-1})	Malondialdehyde (nmol. g^{-1} FW)	Isoleucine	Lysine	Methionine	Phenylalanine	Threonine	Tryptophan	Valine
				(g. 100 g^{-1} protein)						
Site										
Birjand		1371.38	47.00	5.53	6.33	2.29	3.38	4.28	1.36	5.44
Mashhad		1554.75	41.04	4.49	5.66	1.82	2.67	3.60	1.13	4.89
LSD (0.05)		21.59	0.47	0.11	0.09	0.09	0.03	0.033	0.03	0.078
Plant water requirement (%)										
50		1190.67	46.74	5.16	6.24	2.17	3.25	4.21	1.48	5.31
75		1508.08	43.83	5.01	5.87	2.02	2.96	3.94	1.20	5.15
100		1190.67	41.49	4.86	5.88	1.95	2.89	3.67	1.04	5.03
LSD (0.05)		26.45	0.57	0.13	0.11	0.11	0.03	0.041	0.038	0.096
Vermicompost application (t .ha^{-1})										
0		1364.44	44.98	4.94	5.9	2.01	2.96	3.84	1.21	5.11
5		1564.66	43.06	5.08	2.1	2.10	3.10	4.03	1.28	5.22
LSD (0.05)		21.59	0.47	0.11	0.09	0.09	0.03	0.033	0.031	0.078
GABA levels (mg .kg^{-1})										
0		1394.49	48.05	4.92	5.85	1.98	2.96	3.81	1.20	5.09
5		1466.50	43.57	4.98	6.02	2.04	3.01	3.95	1.24	5.15
10		1528.19	40.44	5.13	6.11	2.13	3.11	4.05	1.29	5.24
LSD (0.05)		26.45	0.57	0.13	0.11	0.11	0.09	0.041	0.038	0.096
S.O.V										
Site (S)	1	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Error 1	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plant water requirement (P)	2	**	**	**	**	**	**	**	**	**
S × P	2	*	ns	*	**	ns	ns	*	**	ns
Error 2	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GABA levels (G)	2	**	**	*	**	*	**	**	**	**
Vermicompost application (V)	1	**	**	**	**	*	**	**	**	**
G × V	2	*	ns	*	ns	ns	**	**	*	ns

Table 2. Continued

Experimental treatments	DF	Seed yield	Malondialdehyde	Isoleucine	Lysine	Methionine	Phenylalanine	Threonine	Tryptophan	Valine
P × G	4	**	*	*	ns	ns	**	**	*	ns
P × V	2	**	**	ns	ns	ns	**	**	*	ns
P × G × V	4	**	ns	ns	*	ns	**	**	ns	ns
S × G	2	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	ns
S × V	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*
S × G × V	2	ns	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns
S × P × G	4	*	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns
S × P × V	2	ns	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns
S × P × G × V	4	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
Bartlett's test	-	0.35	0.97	0.19	0.10	0.31	0.51	0.76	0.69	0.36
CV (%)	-	14.44	7.38	6.70	4.63	14.20	9.94	11.54	7.59	4.56

ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار، * و ** به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

**: significant at P≤0.01; *: significant at 0.01<P≤0.05; ns: non-significant (0.05 < P).

جدول ۳- برهم‌کنش رژیم‌های آبیاری و سطوح مختلف GABA بر صفات مورد بررسی کینوا

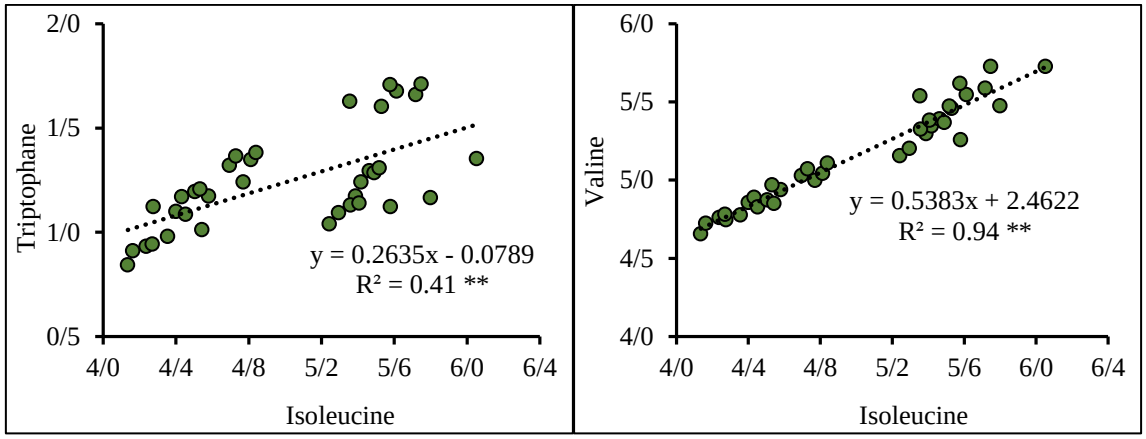
Table 3. Interaction effect of irrigation regims and different levels of GABA on studied traits of quinoa

Plant water requirement (%)	GABA levels (mg. kg^{-1})	Seed yield (kg. ha^{-1})	Malondialdehyde (nmol. g^{-1} FW)	Isoleucine	Lysine	Phenylalanine	Threonine	Tryptophan
				(g. 100 g^{-1} protein)				
50	0	1066.06	51.00	5.06	6.06	3.11	4.11	1.42
	5	1213.71	46.19	5.21	6.20	3.21	4.19	1.50
	10	1292.25	43.04	5.23	6.45	3.42	4.33	1.54
75	0	1468.54	47.84	4.92	5.74	2.93	3.89	1.14
	5	1495.69	43.40	4.96	5.90	2.95	3.95	1.22
	10	1560.00	40.24	5.12	5.98	2.97	3.97	1.26
100	0	1648.88	45.30	4.76	5.77	2.85	3.45	1.04
	5	1690.01	41.12	4.79	5.97	2.87	3.71	1.02
	10	1732.33	38.06	5.04	5.91	2.95	3.86	1.06
LSD (0.05)		45.81	1.003	0.23	0.19	0.063	0.071	0.066

جدول٤- برهم‌کنش رژیم‌های آبیاری و کاربرد ورمی‌کمپوست بر صفات مورد بررسی کینوا

Table 4. Interaction effect of irrigation regims and vermicompost application on studiedt traits of quinoa

Plant water requirement (%)	Vermicompost application (t .ha^{-1})	Seed yield (kg .ha^{-1})	Malondialdehyde (nmol .g^{-1} FW)	Lysine	Phenylalanine	Threonine	Tryptophan
				(g. 100 g^{-1} protein)			
50	0	1043.18	47.67	6.18	3.12	4.14	1.47
	5	1338.16	45.82	6.29	3.37	4.28	1.50
75	0	1445.09	44.80	5.81	2.92	3.89	1.16
	5	1571.07	42.85	5.94	2.99	3.97	1.24
100	0	1605.00	42.47	5.71	2.83	3.49	0.99
	5	1775.82	40.51	6.05	2.94	3.85	1.09
LSD (0.05)		37.40	0.81	0.16	0.051	0.058	0.054



شکل ۱۱- همبستگی بین ایزولوسین با تریپتوفان و والین (: $p \leq 0.01$)**

Figure 11. The correlation between isoleucine with tryptophan and valine (: $p \leq 0.01$)**

جدول ۵- همبستگی بین تیمارهای آزمایشی

Table 5. The correlation between the experimental treatments

Traits	Plant height	Crop growth rate	Relative growth rate	Seed yield
Plant height	1			
Crop growth rate	0.38 *	1		
Relative growth rate	0.46 *	0.77 *	1	
Seed yield	0.59 **	0.66 **	0.41 *	1

* و ** به ترتیب اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

**: $p \leq 0.01$; *: $p \leq 0.05$

نتیجه‌گیری

استفاده از کودهای آلی مانند ورمی کمپوست می‌تواند در دستیابی به حداکثر عملکرد و حاصلخیزی پایدار خاک، بسیار مهم باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کاربرد ورمی کمپوست و گابا در مقایسه با عدم کاربرد آن‌ها توانست شاخص سطح برگ و ویژگی‌های رشدی و عملکردی گیاه کینوا را در شرایط تنش خشکی بهبود بخشد. نتایج آزمایش حاکی از اثر مثبت ورمی کمپوست بر صفات رشد، محتوای اسیدهای آمینه در بذر کینوا و عملکرد دانه آن بود. در شرایط تنش خشکی، استفاده از گابا به تنهایی یا در ترکیب با ورمی کمپوست به طور مؤثر اثرات نامطلوب تنش خشکی بر متابولیسم لیپیدها و تجمع اسیدهای آمینه را کاهش داد. بر اساس نتایج می‌توان بیان نمود که گیاه کینوا با تحریک تجمع اسیدهای آمینه تحمل خود را مجدداً به تنش خشکی افزایش می‌دهد. با توجه به یافته‌های این آزمایش، استفاده از ۵ تن ورمی کمپوست در هکتار به همراه ۱۰ میلی‌گرم در لیتر گابا، به عنوان یک دستاورد نسبتاً جدید، برای بهبود تحمل گیاه در برابر تنش آبی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری

بدینوسیله از دانشگاه بیرجند برای تأمین محل و هزینه‌های اجرای طرح تشکر می‌شود.

References

Adel, H. (2020). Towards expanding quinoa cultivation in Egypt: The effect of compost and vermicompost on quinoa pests, natural enemies and yield under field conditions. *Agricultural Science*, 11(2), 191–209. https://doi.org/10.4236/as.2020.112012

Ahluwalia, O., Singh, P.C., & Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, e100032. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032

Ahmadi, S.H., Solgi, S., & Sepaskhah, A.R. (2019). Quinoa: A super or pseudo-super crop? Evidences from evapotranspiration, root growth, crop coefficients, and water productivity in a hot and semi-arid area under three planting densities. *Agricultural Water Manageemnt*, 225, e105784. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105784

Ahmed, T., Noman, M., Manzoor, N., Shahid, M., Abdullah, M., Ali, L., Wang, G., Hashem, A., Al-Arjani, A.B.F., Alqarawi, A.A., & Abd_Allah, E.F. (2021). Nanoparticle-based amelioration of drought stress and cadmium toxicity in rice via triggering the stress responsive genetic mechanisms and nutrient acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209, e111829. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111829

Bellitürk, K., Fang, L., & Görres, J.H. (2023). Effect of post-production vermicompost and thermophilic compost blending on nutrient availability. *Waste Management*, 155, 146–152. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.032

Berova, M., Pevicharova, G., Stoeva, N., Zlatev, Z., & Karanatsidis, G. (2013). Vermicompost affects growth, nitrogen content, leaf gas exchange and productivity of pepper plants. *Journal of Elementology*, 18(4). https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.4.393

Beyrami, H., Yazdani-Biouki R., & Salehi M. (2024). Effects of different levels of drought stress on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.). *Journal of Water and Sustainable Development*, 10, (4), 49-58. https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i4.2307-1254 [In Persian].

Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). Chenopodium quinoa- An India perspective. *Industrial Crops and Product*, 23, 73-78. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.04.002

Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C., Fritschi, F.B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*, 171(1), 66–76. https://doi.org/10.1111/ppl.13203

Dabravolski, S.A., & Isayenkov, S.V. (2023). The Role of the γ-Aminobutyric Acid (GABA) in Plant Salt Stress Tolerance. *Horticulturae*, 9(2), e230. https://doi.org/10.3390/horticulturae9020230

Fang, W., Qi, F., Yin, Y., & Yang, Z. (2020). Exogenous spermidine promotes γ-aminobutyric acid accumulation and alleviates the negative effect of NaCl stress in germinating soybean (*Glycine max* L.). *Foods*, 9(3), 267**.** https://doi.org/10.3390/foods9030267

FAO (Food and Agriculture Organization). (1992). A computer program for irrigation planning and management; FAO Irrigation and Drainage Paper No.46, Rome, Italy.

Feizabadi, A., Noormohammadi, G., & Fatehi, F. (2021). Changes in growth, physiology, and fatty acid profile of rapeseed cultivars treated with vermicompost under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 200–208**.** https://doi.org/10.1007/s42729-020-00353-4

Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Bahador, M., & Razmjoo, J. (2022). Biochemical and yield response of sugar beet to drought stress and foliar application of vermicompost tea. *Plant Stress*, 5, e100087. https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100087

Habibi, S., & Majidian M. (2014). Effect of different levels of nitrogen fertilizer and vermi-compost on yield and quality of sweet corn (*Zea mays* Hybrid Chase). *Journal of Crop Production and Processing*, 4 (11), 15-26. https://doi.org/20.1001.1.22518517.1393.4.11.2.6 [In Persian].

Hakan, O. (2002). Sowing date and nitrogen rate effects on growth, yield and yield components of two summer rapseed cultivars. *European Journal of Agronomy*, 19, 453-463. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00136-3

Hanif, S., Saleem, M.F., Sarwar, M., Irshad, M., Shakoor, A., Wahid, M.A., & Khan, H.Z. (2021). Biochemically triggered heat and drought stress tolerance in rice by proline application. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 305–312. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10095-3

Hasan, M.M., Alabdallah, N.M., Alharbi, B.M., Waseem, M., Yao, G., Liu, X.D., Abd El-Gawad, H.G., El-Yazied, A.A., Ibrahim, M.F., Jahan, M.S., & Fang, X.W. (2021). GABA: a key player in drought stress resistance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), e10136. https://doi.org/10.4236/as.2020.112012

Heath, R.L., & Parker, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplast: 1. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 25, 189–198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Kaboosi, E., Rahimi, A., Abdoli, M., & Ghabooli, M. (2023) Comparison of *Serendipita indica* inoculums and a commercial biofertilizer effects on physiological characteristics and antioxidant capacity of maize under drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 900–911. https://doi.org/10.1007/s42729-022-01091-5

Khodabin, G., Lightburn, K., Hashemi, S.M., Moghada, M.S.K., & Jalilian, A. (2022). Evaluation of nitrate leaching, fatty acids, physiological traits and yield of rapeseed (Brassica napus) in response to tillage, irrigation and fertilizer management. *Plant and Soil*, 473(1-2), 423–440. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05294-0

Li, G., Wan, S., Zhou, J., Yang, Z., & Qin, P. (2010). Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean

(*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels. *Industrial Crops and Products*, 31(1), 13–19. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.015

Lotfi, R., Abbasi, A., Kalaji, H.M., Eskandari, I., Sedghieh, V., Khorsandi, H., Sadeghian, N., Yadav, S., & Rastogi, A. (2022). The role of potassium on drought resistance of winter wheat cultivars under cold dryland conditions: Probed by chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 182, 45–54. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.019

Miranda-Apodaca, J.., Yoldi-Achalandabao, A., Aguirresarobe, A., del Canto, A., & Pérez-López, U. (2018). Similarities and differences between the responses to osmotic and ionic stress in quinoa from a water use perspective. *Agricultural Water Management*, 203, 344–352. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.026

Mukherjee, A., Lal, R., & Zimmerman, A.R. (2014) Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *Science of the Total Environment*, 487, 26-36. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.141

Nayyar, H., Kaur, R., Kaur, S., & Singh, R. (2014). γ-Aminobutyric acid (GABA) imparts partial protection from heat stress injury to rice seedlings by improving leaf turgor and upregulating osmoprotectants and antioxidants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 408–419. https://doi.org/10.1007/s00344-013-9389-6

Qadir, Y., Akhtar, K., Ahmad, A., Shakoor, A., Saqib, M., Hussain, S., & Rafiq, M. (2019). Wheat production under Changing climate: consequence of environmental vulnerabilities on different abiotic and biotic stresses. *Journal of Globala Innovations in Agricultural Science*, 7(1), 7-17. https://doi.org/10.22194/jgiass/7.842

Rui, M., Ma, C., White, J.C., Hao, Y., Wang, Y., Tang, X., Yang, J., Jiang, F., Ali, A., Rui, Y., Cao, W., Chen, G., & Xing, B. (2018). Metal oxide nanoparticles alter peanut (*Arachis hypogaea* L.) physiological response and reduce nutritional quality: a life cycle study. *Environmental Science: Nano*, 5, 2088–2102. https://doi.org/10.1039/C8EN00436F

Shahid, M., Saleem, M.F., Saleem, A., Sarwar, M., Khan, H.Z., & Shakoor, A. (2020). Foliar potassium-induced regulations in glycine betaine and malondialdehyde were associated with grain yield of heat-stressed bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 1785–1798. https://doi.org/10.1007/s42729-020-00250-w

Sun, Y., Liu, F., Bendevis, M., Shabala, S., & Jacobsen, S.E. (2014). Sensitivity of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties to progressive drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(1), 12-23**.** https://doi.org/10.1111/jac.12042

Wu, X., Jia, Q., Ji, S., Gong, B., Li, J., Lü, G., & Gao, H. (2020). Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in tomato by modulating Na^+ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. *BMC Plant Biology*, 20, 1–21**.** https://doi.org/10.1186/s12870-020-02669-w

Xu, B., Long, Y., Feng, X., Zhu, X., Sai, N., Chirkova, L., Betts, A., Herrmann, J., Edwards, E.J., Okamoto, M., & Hedrich, R. (2021). GABA signalling modulates stomatal opening to enhance plant water use efficiency and drought resilience. *Nature Communications*, 12(1), e1952. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21694-3

Yuan, D., Wu, X., Gong, B., Huo, R., Zhao, L., Li, J., Lü, G., & Gao, H. (2023). GABA metabolism, transport and their roles and mechanisms in the regulation of abiotic stress (hypoxia, salt, drought) resistance in plants. *Metabolites*, 13(3), e347**.** https://doi.org/10.3390/metabo13030347