

## Effect of drought stress and foliar application of some growth regulators on physiological and biochemical characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)

Neda Pakgohar <sup>a</sup>, Ali Akbar Maghsoudi Mood <sup>b</sup>, Hassan Farahbakhsh <sup>\*b</sup>, Amin Pasandi pour <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ph.D Student of Crop Physiology, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>b</sup> Genetic and Plant Production Department, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>c</sup> Ph.D Graduate, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

\*Corresponding Author: [Hfarahbakhsh@uk.ac.ir](mailto:Hfarahbakhsh@uk.ac.ir)

Received: 12 November 2025

Accepted: 16 June 2025

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.529886.1497

### How to cite this article:

Pakgohar, N., Maghsoudi Mood, A.A., Farahbakhsh, H. and Pasandi Pour, A., 2026. Effect of drought stress and foliar application of some growth regulators on physiological and biochemical characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Crop Science Research in Arid Regions*, 8(1), 153-172. <https://doi.org/10.22034/csrar.2025.529886.1497>

### Abstract

**Introduction:** Drought stress accounts for over 70% of the potential losses in crop yield and productivity worldwide and is one of the chronic abiotic crop stresses that affect plant growth and development. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is rich in vital minerals, vitamins, and health-promoting substances, and its balanced amino acid composition and high protein quality make it a nutritious food. As quinoa is suited to many agroecological zones and resistant to abiotic stresses like salinity and drought, it is a good option for improving food security in the face of climate change. Melatonin (MT) is a common indoleamine compound found in plants that is linked to a number of physiological and metabolic functions, including senescence and the germination, flowering, and fruiting of seeds. Furthermore, melatonin is essential for controlling how plants adjust to stressful situations. Melatonin can encourage root and shoot growth, particularly in drought-stressed environments. A class of plant steroid hormones known as brassinosteroids (BRs) significantly affects a number of plant growth indices, such as the leaf area index, crop growth rate, relative water content, ion leakage, proline accumulation, and protein content. Because of their ability to enhance plant development and resilience to abiotic stressors including salinity and drought, brassinosteroids are a major focus of agricultural research and crop management plans.

**Materials and Methods:** This study was carried out in split plots using a randomized complete block design with three replications in 2019–2020 and 2020–2021, at the Shahid Bahonar University Research Farm, Kerman, which is situated at an elevation of 1774 meters above sea level, 75 degrees 7 minutes 13 seconds east longitude, and 30 degrees 14 minutes 36 seconds north latitude. In this experiment, the main factor included three irrigation levels (100, 75, and 50 percent of easily available water) and the sub-factor included nine foliar spray levels (control, melatonin 0.5  $\mu$ M, melatonin 1  $\mu$ M, brassinosteroid 0.25  $\mu$ M, brassinosteroid 0.5  $\mu$ M, combination of melatonin 0.5  $\mu$ M and



brassinosteroid 0.25  $\mu$ M, combination of melatonin 1  $\mu$ M and brassinosteroid 0.25  $\mu$ M, combination of melatonin 0.5  $\mu$ M and brassinosteroid 0.5  $\mu$ M, and combination of melatonin 1  $\mu$ M and brassinosteroid 0.5  $\mu$ M).

**Results and Discussion:** Severe drought stress reduced the relative water content (36.95%), carotenoid (43.41%) and grain yield (51.66%) of quinoa compared to the non-stress treatment. Foliar application of melatonin 0.5  $\mu$ M + brassinosteroid 0.5  $\mu$ M increased the relative water content, carotenoid and grain yield of quinoa by 26.58, 41.55 and 62.96% respectively compared to the non-foliar application of growth regulators under severe stress conditions. With increasing drought stress levels, the activities of ascorbate peroxidase and phenylalanine ammonia lyase enzymes also increased. Also, the use of growth regulators increased the activities of these two enzymes under moderate and severe stress conditions.

**Conclusion:** The results of this study showed that drought stress significantly affects the physiological and biochemical traits of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*). The use of melatonin and brassinosteroid as stress modulators improved the relative leaf water content, reduced ion leakage, and increased the activity of antioxidant enzymes. These compounds also helped to increase the content of chlorophyll and carotenoids, which in turn could lead to improved plant performance under drought stress conditions.

**Keywords:** Ascorbate peroxidase enzyme, Carotenoid, Photosynthetic pigments, Relative water content, Seed yield

## تأثیر تنش خشکی و محلول پاشی برخی تنظیم کننده های رشد بر خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa Willd.*)

ندا پاک گوهر<sup>۱</sup>، علی اکبر مقصودی مود<sup>۲</sup>، حسن فرح بخش<sup>۳\*</sup>، امین پسندی پور<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

\* مسئول مکاتبه: Hfarahbakhsh@uk.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2025.529886.1497

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱

### چکیده

به منظور بررسی اثر تنش خشکی و مصرف تعدیل کننده های تنش بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کینوا، آزمایشی به صورت کرت های خرد شده در قالب بلوک های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال های ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. در این آزمایش، عامل اصلی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول) و عامل فرعی شامل نه سطح محلول پاشی (شاهد، ملاتونین ۰/۵ میکرومولار، ملاتونین یک میکرومولار، براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار، ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار و ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار) بودند. تنش خشکی شدید سبب کاهش محتوای نسبی آب (۳۶/۹۵ درصد)، کاروتنوئید (۴۳/۴۱ درصد) و عملکرد دانه (۵۱/۶۶ درصد) گیاه کینوا نسبت به تیمار عدم اعمال تنش گردید، محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار به ترتیب سبب افزایش ۲۶/۵۸، ۴۱/۵۵ و ۶۲/۹۶ درصدی میزان محتوای نسبی آب، کاروتنوئید و عملکرد دانه گیاه کینوا نسبت به تیمار عدم محلول پاشی تنظیم کننده های رشد در شرایط تنش شدید گردید. با افزایش سطح تنش خشکی، فعالیت آنزیم های آسکوربات پراکسیداز و فنیل آلانین آمونیا لایز نیز افزایش یافت. همچنین، استفاده از تنظیم کننده های رشد باعث افزایش فعالیت این دو آنزیم در شرایط تنش متوسط و تنش شدید شد. نتایج نشان می دهند که استفاده همزمان از ملاتونین و براسینواستروئید در سطوح مختلف آبیاری، به ویژه در شرایط کم آبی، می تواند استراتژی مؤثری برای افزایش تحمل به تنش در گیاه کینوا باشد.

**واژه های کلیدی:** آنزیم آسکوربات پراکسیداز، رنگیزه های فتوسنتزی، عملکرد دانه، کاروتنوئید، محتوای نسبی آب

### مقدمه

آنزیم ها را غیرفعال کنند و ساختار و نفوذپذیری غشاهای سلولی را از بین ببرند (Mansori et al., 2015). تنش خشکی یکی از مهمترین عوامل اکولوژیکی است که با کاهش عملکرد محصول برای اهداف اقتصادی یا بقا، به ویژه در مرحله رویشی بر رشد، تولید و عملکرد گیاهان تأثیر منفی می گذارد (Al-Huqail et al., 2023).

کینوا (*Chenopodium quinoa Willd.*) متعلق به خانواده Chenopodiaceae، یک شبه غله است که به طور سنتی در منطقه آند کشت می شود و دانه هایی تولید می کند که می توانند به آرد تبدیل شوند و به عنوان یک محصول غلات مورد استفاده

تنش خشکی یک عامل استرس زای محیطی مهم است که باعث ایجاد تغییراتی در صفات فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان می شود و در نهایت منجر به کاهش رشد گیاه و بهره وری محصول می گردد (Er-Rqaibi et al., 2025). تجمع گونه های فعال اکسیژن ( $ROS^1$ ) در سلول های گیاهی یکی از تغییرات فیزیولوژیکی و بیولوژیکی ناشی از تنش خشکی است که باعث ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاهان نیز می شود. رادیکال های فعال اکسیژن مضر هستند و می توانند به دستگاه فتوسنتزی آسیب برسانند، پروتئین ها و

<sup>1</sup> Reactive oxygen species

قرار گیرند (Encina-Zelada et al., 2017). تنوع ژنتیکی بالا، آن را قادر می‌سازد که در شرایط محیطی متنوع رشد کند (Pereira et al., 2019). به دلیل ارزش غذایی عالی، کینوا به عنوان جایگزینی برای محصولات غلات در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است (Fuentes and Paredes-Gonzalez, 2015). کشت کینوا در مناطق متعددی در کشورهای آمریکایی، آسیایی و اروپایی مورد مطالعه قرار گرفته است (Rodríguez, 2021).

مطالعات متعدد از استفاده‌ی هورمون‌های رشد گیاهی به عنوان یک رویکرد مؤثر جهت مدیریت تنش خشکی حمایت می‌کنند (Corell et al., 2012).

این هورمون‌ها توسط گیاهان در پاسخ به محرک‌های محیطی سنتز می‌شوند و به عنوان سیگنال‌های شیمیایی عمل می‌کنند که سازگاری و تحمل گیاهان را در برابر تنش‌های مختلف محیطی از جمله تنش خشکی افزایش می‌دهند. در میان این هورمون‌ها، براسینواستروئیدها (BRs)<sup>1</sup> گروه متنوعی از ترکیبات مورد استفاده برای کاهش تنش گیاه را نشان می‌دهند. براسینواستروئیدها به عنوان هورمون‌های گیاهی، رشد را تنظیم کرده و بهره‌وری را بهبود می‌بخشند. اولین براسینواستروئید کشف شده، براسینولید بود که در سال ۱۹۷۹ شناسایی شد. این ماده از گرده گیاه کلزا (*Brassica napus*) جدا شد (Rehman et al., 2022). مطالعات متعدد، نقش اساسی این ترکیبات را در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف از جمله تکثیر سلولی، گسترش، باروری، پیری، رشد برگ و تمایز برجسته کرده‌اند. این ترکیبات طیف وسیعی از فعالیت‌های بیولوژیکی را از خود نشان می‌دهند و با اصلاح متابولیسم گیاه و محافظت در برابر تنش‌های محیطی، فرصت‌هایی را برای بهبود عملکرد محصول ارائه می‌دهند (Barooti et al., 2025).

ملاتونین (MT) یک ترکیب ایندول آمین است که به طور گسترده در گیاهان وجود دارد و با فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی و متابولیکی مانند جوانه‌زنی، بذر، گلدهی و میوه‌دهی و همچنین پیری مرتبط است (Zhao et al., 2025). علاوه بر این، ملاتونین نقش مهمی در تنظیم سازگاری گیاه با محیط‌های استرس‌زا ایفا می‌کند. به‌ویژه تحت تنش خشکی،

ملاتونین می‌تواند رشد ساقه و توسعه ریشه را تقویت کند (Zhu et al., 2023). ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان را افزایش دهد، گونه‌های فعال اکسیژن ناشی از تنش خشکی را حذف کند و آسیب اکسیداتیو را کاهش دهد و در نتیجه تحمل به خشکی را بهبود بخشد (Kuppusamy et al., 2023). مطالعات قبلی نشان داده‌اند (Luo et al., 2022) که ملاتونین برون‌زا با تنظیم سیستم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی و مواد تنظیم‌کننده اسمزی در محصولاتمانند برنج *Oryza sativa* L. و سیب‌زمینی *Solanum tuberosum* L. آسیب ناشی از تنش خشکی به غشاهای سلولی را کاهش می‌دهد (El-Yazied et al., 2022). علاوه بر این، ملاتونین از اندام‌های فتوسنتزی در برابر آسیب‌های ناشی از تنش خشکی با کاهش سرعت تخریب کلروفیل در طول تنش خشکی، بهبود جذب نور و ظرفیت‌های انتقال الکترون محافظت می‌کند (Imran et al., 2021).

این مطالعه با هدف روشن کردن نقش ملاتونین و براسینواستروئید در کاهش تنش خشکی در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) انجام شد.

با توجه به درک محدود از تعاملات بین ملاتونین و براسینواستروئید در زمینه تحمل به تنش‌های غیرزیستی، این تحقیق به دنبال بررسی چگونگی تأثیر این ترکیبات زیست‌فعال بر پاسخ‌های گیاه در شرایط کمبود آب بود. این تحقیق با ارزیابی طیف وسیعی از پارامترهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، بینشی در مورد مکانیسم‌هایی که از طریق آنها ملاتونین و براسینواستروئید ممکن است مقاومت گیاه را در برابر تنش خشکی افزایش دهند، ارائه می‌دهد و دانش ارزشمندی را به شیوه‌های کشاورزی پایدار در محیط‌های مستعد تنش ارائه می‌دهد.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان با طول جغرافیایی ۷۵ درجه و ۷ دقیقه و ۱۳ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه و ۳۶ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۷۷۴ متر از سطح دریا انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در

<sup>1</sup> Brassinosteroids

ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینوآستروئید ۰/۵ میکرومولار و ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینوآستروئید ۰/۵ میکرومولار) بودند. قبل از کاشت، نمونه گیری از خاک در عمق های صفر تا ۳۰ سانتی متر و ۳۰ تا ۶۰ سانتی متر انجام شد و افزودن مواد غذایی به خاک براساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) انجام گردید.

این آزمایش، عامل اصلی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول) و عامل فرعی شامل نه سطح محلول پاشی (شاهد، ملاتونین ۰/۵ میکرومولار، ملاتونین یک میکرومولار، براسینوآستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، براسینوآستروئید ۰/۵ میکرومولار، ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینوآستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینوآستروئید ۰/۲۵ میکرومولار، ترکیب

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Soil physicochemical properties at the experimental location

| مشخصات خاک<br>Soil properties              | عمق خاک<br>Soil depth |       |                       |       |
|--------------------------------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
|                                            | سال ۱۳۹۹<br>Year 2020 |       | سال ۱۴۰۰<br>Year 2021 |       |
|                                            | 0-30                  | 30-60 | 0-30                  | 30-60 |
|                                            |                       |       |                       |       |
| بافت خاک<br>Soil texture                   | Loam                  | Loam  | Loam                  | Loam  |
| نیتروژن<br>Nitrogen (ppm)                  | 0.05                  | 0.055 | 0.06                  | 0.07  |
| فسفر<br>Phosphorus (ppm)                   | 7.05                  | 8.00  | 7.44                  | 8.30  |
| پتاسیم<br>Potassium (ppm)                  | 290                   | 295   | 310                   | 320   |
| هدایت الکتریکی<br>EC (dS m <sup>-1</sup> ) | 2.3                   | 2.1   | 2.5                   | 2.2   |
| اسیدیته<br>pH                              | 7.4                   | 7.5   | 7.5                   | 7.65  |
| ماده آلی<br>Organic matter (%)             | 0.42                  | 0.4   | 0.46                  | 0.44  |

روی ردیف به ۷/۵ سانتی متر تنظیم و تراکم ۳۳ بوته در مترمربع حاصل شد. آبیاری به صورت جوی و پشته و با استفاده از لوله و کنتور حجمی صورت گرفت، به طوری که میزان آب مصرفی برای تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه، آبیاری نرمال ۶۴۴۰ مترمکعب در هکتار محاسبه گردید. پس از کاشت تا زمان سبز شدن و استقرار بوته ها، آبیاری به صورت کامل انجام شد. محلول پاشی در دو مرحله رشدی، یکبار در شروع خوشه دهی و یکبار در شروع دانه بندی و در دو نوبت در اوایل صبح و قبل از طلوع آفتاب با استفاده از سم پاش دستی انجام شد. تیمارهای تنش پس از اولین مرحله محلول پاشی اعمال شدند.

کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل و به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به صورت پایه و کود نیتروژن به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره و در سه مرحله، به صورت پایه در مرحله شش برگی و اواسط گلدهی در اختیار گیاه قرار داده شد. به منظور مهار علف های هرز، علف کش ترفلان به میزان دو لیتر در هکتار در محل مورد نظر جهت کاشت استفاده و به کمک دیسک با خاک مخلوط گردید.

کاشت بذور کینوا، رقم *Titicaca*، در اول مردادماه به صورت خطی و به فاصله ۴۰ سانتی متر و به طول سه متر انجام و کرت ها بلافاصله آبیاری شدند. در هر کرت فرعی، شش خط با تراکم بالا کشت شد. جهت دستیابی به تراکم مورد نظر در مرحله سه تا چهار برگی با عملیات تنک، فاصله بوته ها در

غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدها می‌باشد (Lichtenthaler and Wellburn, 1983).

### فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX<sup>6</sup>)

مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم ۵۰ میلی‌مولار (pH= 7)، آسکوربات ۰/۵ میلی‌مولار، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ۰/۱۵ میلی‌مولار، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. تغییرات جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر ثبت گردید (Nakano and Asada, 1981).

### سنجش فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز (PAL<sup>7</sup>)

محاسبه فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیالاز به روش کواچیک و کلیدوس انجام گردید (Kováčik and Klejdus, 2012). ۰/۵ گرم از بافت تازه در دو میلی‌لیتر از بافر استخراج (بافر پتاسیم فسفات با pH= 8) هموژن شد. سپس عصاره حاصل در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس، ۱۵۰ میکرولیتر از عصاره استخراج شده، ۲۰۰ میکرولیتر فنیل آلانین ۰/۱ مولار در بافر پتاسیم فسفات با اسیدیته هشت و ۶۵۰ میکرولیتر بافر پتاسیم فسفات ۰/۱ مولار با اسیدیته هشت اضافه شد. سپس مخلوط به دست آمده به مدت یک ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد که اوج فعالیت فنیل آلانین آمونیالاز است، قرار گرفت. سپس ۵۰ میکرولیتر HCL شش مولار برای غیرفعال کردن فنیل آلانین آمونیالاز به مخلوط افزوده شد. پس از آن، نمونه در جریان هوا تبخیر گردید و به رسوب حاصل، یک میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۰۵ مولار اضافه گردید. غلظت اسید سینامیک با اندازه‌گیری مقدار جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر و با استفاده از استاندارد اسید سینامیک تعیین شد. یک واحد از فنیل آلانین آمونیالاز برابر با یک میکروگرم از اسید سینامیک تولید شده در ساعت است.

### تجزیه و تحلیل آماری

محاسبات آماری با بهره‌گیری از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد و میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفتند. همچنین، نرمالیت

### اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC<sup>1</sup>)

ابتدا وزن تر برگ (FW<sup>2</sup>) اندازه‌گیری شد و سپس نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق داخل آب مقطر غوطه‌ور گردید و پس از این زمان وزن آماس نمونه (TW<sup>3</sup>) خوانده شد. سپس نمونه‌ها ۴۸ ساعت درون آون (مدل E240) با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن خشک (DW<sup>4</sup>) به دست آمد (Sánchez et al., 1998). در فرمول ۱ قرار گرفت:

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

### اندازه‌گیری میزان نشت یونی

پانزده دیسک از برگ تازه (۲۵/۰ سانتی‌متر مربع از هر برگ) سه بار (۲ تا ۳ دقیقه) با آب دیونیزه شسته و سپس روی ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه شناور شدند. نشت الکترولیت در محلول پس از ۲۲ ساعت شناور شدن در دمای اتاق با استفاده از یک دستگاه سنجش رسانایی (Elmetron, C-C 505) اندازه‌گیری شد. رسانایی کل پس از نگهداری فلاسک‌ها در آون (۹۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲ ساعت (EC<sup>2</sup>) به دست آمد. نتایج به صورت رسانایی نسبی الکترولیت (REC<sup>3</sup>) بیان شدند (Campos et al., 2003).

### اندازه‌گیری مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی

برای سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش لیچنتنالر (۱۹۸۷) استفاده شد. ۰/۱ گرم از برگ‌های تازه گیاه در هاون چینی حاوی ۱۵ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد سائیده شد و پس از صاف کردن، جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Visible مدل Cary-50 ساخت شرکت Varian در طول موج‌های ۶۴۶/۸، ۶۶۳/۲ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد. جهت تنظیم دستگاه از استن ۸۰ درصد به عنوان شاهد استفاده گردید. غلظت رنگیزه‌های گیاهی با استفاده از رابطه‌های ۵-۲ محاسبه گردید.

$$Chl.a = (12.25A663.2 - 2.79A646.8) \quad (2)$$

$$Chl.b = (21.21A646.8 - 5.1 A663.2) \quad (3)$$

$$Chl.a/b = Chl.a / Chl.b \quad (4)$$

$$Car = [(1000A470 - 1.8 Chl.a - 85.02 Chl.b) / 198] \quad (5)$$

در این فرمول Chl.a, Chl.b, Chl.a/b و Car به ترتیب

<sup>5</sup> Relative electrolit conductivity

<sup>6</sup> Ascorbate peroxidase

<sup>7</sup> Phenyl alanin amonialiase

<sup>1</sup> Relative water content

<sup>2</sup> Fresh weight

<sup>3</sup> Turgur weight

<sup>4</sup> Dry weight

داده ها با کمک نرم افزار مینی تب مورد ارزیابی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### محتوای نسبی آب برگ

نتایج به دست آمده بیانگر آن بود که تنش خشکی، محلول پاشی، اثر متقابل سال در تنش خشکی و اثر متقابل تنش خشکی در محلول پاشی به طور معنی داری (در سطح احتمال یک درصد) میزان محتوای نسبی آب برگ گیاه کینوا را تحت تاثیر قرار دادند (جدول ۲). روند تغییرات میزان محتوای نسبی آب برگ نشان داد که با افزایش میزان تنش خشکی از میزان محتوای نسبی آب برگ کاسته شد، به نحوی که کمترین میزان

محتوای نسبی آب برگ در تیمار عدم محلول پاشی و در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول مشاهده گردید. عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول سبب کاهش ۳۶/۹۵ درصدی میزان محتوای نسبی آب نسبت به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول گردید. بیشترین میزان محتوای نسبی آب برگ مربوط به تیمار محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسترینوئید ۰/۲۵ میکرومولار در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول بود که سبب افزایش ۳/۳۳ درصدی میزان محتوای نسبی آب برگ نسبت به تیمار عدم محلول پاشی در آن سطح آبیاری گردید (شکل ۱).

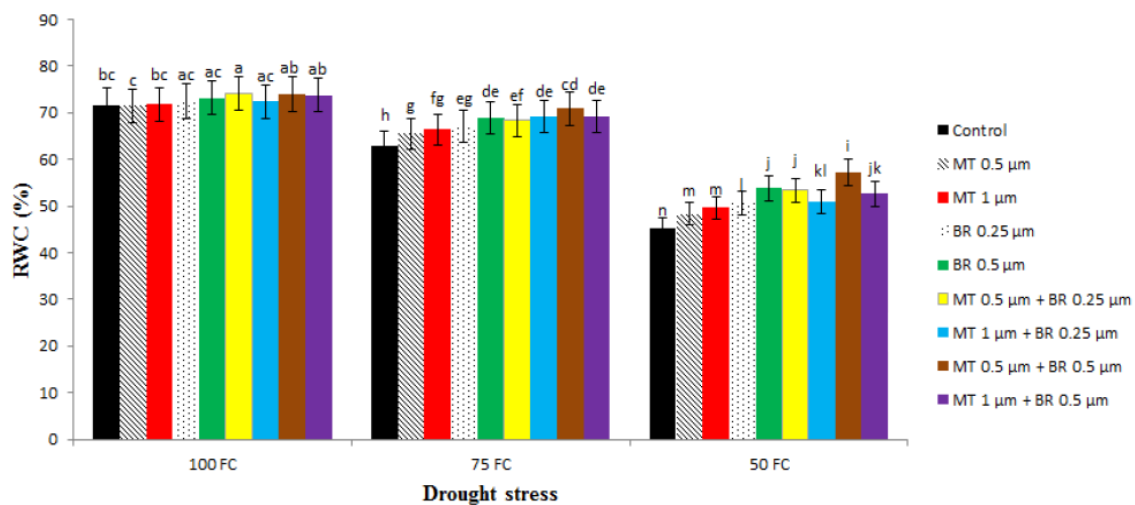
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس ویژگی های فیزیولوژیکی و رنگی های فتوسنتزی گیاه کینوا

Table 2- Results of variance analysis of physiological characteristics and photosynthetic pigments of quinoa plants.

| منابع تغییر            | درجه آزادی        | محتوای نسبی آب برگ         | نشست یونی                             | کلروفیل a                             | کلروفیل b                             | کلروفیل a/b                             |
|------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| Source of variation    | Degree of freedom | Relative water content (%) | Relative electrolyte conductivity (%) | Chlorophyll a (mg g <sup>-1</sup> FW) | Chlorophyll b (mg g <sup>-1</sup> FW) | Chlorophyll a/b (mg g <sup>-1</sup> FW) |
| سال                    | 1                 | 50.45 <sup>ns</sup>        | 0.48 <sup>ns</sup>                    | 524.48 <sup>ns</sup>                  | 873.97 <sup>ns</sup>                  | 0.045 <sup>ns</sup>                     |
| Year (Y)               |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| خطای Y                 | 4                 | 47.77 <sup>**</sup>        | 6.78 <sup>**</sup>                    | 988.99 <sup>**</sup>                  | 339.47 <sup>**</sup>                  | 0.011 <sup>*</sup>                      |
| Error Y                |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| تنش                    | 2                 | 6724.18 <sup>**</sup>      | 1585.33 <sup>**</sup>                 | 2051.4 <sup>**</sup>                  | 472.34 <sup>ns</sup>                  | 0.069 <sup>ns</sup>                     |
| Drought (a)            |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| a × Y                  | 2                 | 17.85 <sup>**</sup>        | 0.09 <sup>ns</sup>                    | 58.85 <sup>ns</sup>                   | 205.13 <sup>ns</sup>                  | 0.054 <sup>ns</sup>                     |
| خطای a                 | 8                 | 93.12 <sup>ns</sup>        | 2.34 <sup>ns</sup>                    | 32.71 <sup>ns</sup>                   | 202.06 <sup>**</sup>                  | 0.046 <sup>**</sup>                     |
| Error a                |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| محلول پاشی             | 8                 | 89.27 <sup>**</sup>        | 71.98 <sup>**</sup>                   | 125.50 <sup>**</sup>                  | 279.05 <sup>**</sup>                  | 0.024 <sup>**</sup>                     |
| Foliar application (b) |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| Y × b                  | 8                 | 2.51 <sup>ns</sup>         | 0.27 <sup>ns</sup>                    | 12.85 <sup>ns</sup>                   | 3.88 <sup>ns</sup>                    | 0.001 <sup>ns</sup>                     |
| a × b                  | 16                | 10.90 <sup>**</sup>        | 23.44 <sup>**</sup>                   | 15.06 <sup>ns</sup>                   | 15.71 <sup>*</sup>                    | 0.001 <sup>ns</sup>                     |
| Y × a × b              | 16                | 2.30 <sup>ns</sup>         | 0.45 <sup>ns</sup>                    | 15.09 <sup>ns</sup>                   | 3.72 <sup>ns</sup>                    | 0.001 <sup>ns</sup>                     |
| خطا                    | 96                | 3.06                       | 1.46                                  | 19.22                                 | 8.65                                  | 0.003                                   |
| Error                  |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |
| ضریب تغییرات           | —                 | 2.74                       | 4.48                                  | 2.50                                  | 2.58                                  | 3.84                                    |
| Coefficient variation  |                   |                            |                                       |                                       |                                       |                                         |

<sup>ns</sup>، <sup>\*</sup> و <sup>\*\*</sup> به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک درصد و ۵ درصد و غیر معنی داری می باشند.

<sup>\*</sup>، <sup>\*\*</sup>، and <sup>ns</sup> are significant at 5% and 1% probability levels and non-significant, respectively.



شکل ۱- اثر متقابل تنش خشکی و تنظیم‌کننده‌های رشد روی محتوای نسبی آب برگ گیاه کینوا

Figure 1- Interaction of drought stress and growth regulators on relative leaf water content of quinoa plant

براسینواسترینوئید منجر به بهبود شاخص سطح برگ و نرخ رشد محصول می‌شود، که به‌نوبه خود تأثیر مثبتی بر محتوای نسبی آب برگ دارد (Anwar et al., 2018). این بهبود محتوای نسبی آب برگ را می‌توان به توانایی براسینواسترینوئیدها در تعدیل رفتار روزنه‌ای و افزایش جذب آب ریشه نسبت داد، که مدیریت بهتر آب را در داخل گیاه تسهیل می‌کند (Nawaz et al., 2017).

### نشت یونی

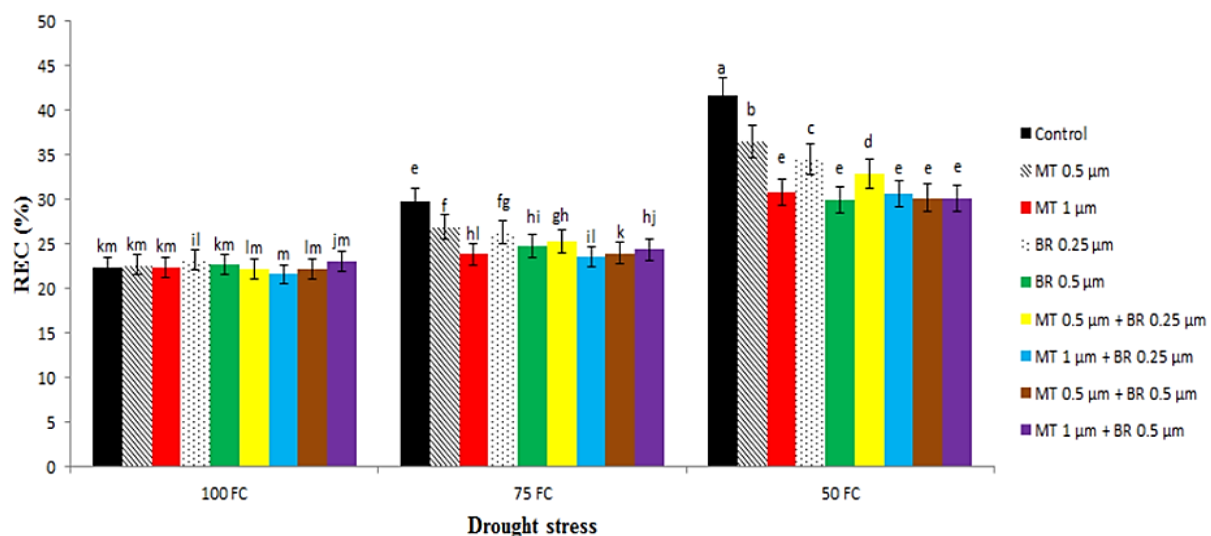
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات تنش خشکی، محلول‌پاشی و اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی بر میزان نشت یونی برگ گیاه کینوا معنی‌دار بودند (جدول ۲). روند تغییرات میزان نشت یونی نشان داد که با افزایش میزان تنش خشکی بر میزان نشت یونی افزوده شد. بیشترین میزان نشت یونی از تیمار عدم محلول‌پاشی در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول به‌دست آمد، به‌طوری‌که میزان نشت یونی در تیمار عدم محلول‌پاشی و در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول، افزایش ۸۵/۶۰ درصدی را نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول نشان داد. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی نشان داد که تیمارهای محلول‌پاشی در سطوح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول سبب کاهش معنی‌دار میزان نشت یونی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی در هر سطح آبیاری گردیدند (شکل ۲).

اثر نامطلوب تنش خشکی بر محتوای نسبی آب برگ (RWC) ممکن است ناشی از کاهش جریان آب باشد که به‌نوبه خود منجر به افزایش دهیدراتاسیون پروتوپلاسم، آسیب اکسیداتیو به کلروپلاست‌ها، به‌خطر افتادن یکپارچگی غشاهای سلولی، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش غلظت  $\text{CO}_2$  در سلول‌های مزوفیل و جذب نور می‌شود. فرآیند دهیدراتاسیون غشا در طول تنش آبی باعث آسیب و جابجایی ساختار لیپیدی می‌شود و در نتیجه باعث کاهش یکپارچگی غشای سلولی می‌گردد (Chamani et al., 2025). ملاتونین تأثیر مثبتی بر محتوای نسبی آب در محصولات مختلف تحت تنش خشکی دارد. در گیاه آلاله (*Ranunculus asiaticus*)، استفاده از ملاتونین باعث افزایش محتوای نسبی آب به‌میزان ۶/۴ درصد در شرایط تنش خشکی شد، که نشان دهنده بهبود قابلیت نگهداری آب است (Eisa et al., 2023). به‌همین ترتیب در گندم، استفاده از ملاتونین محتوای نسبی آب برگ را افزایش داد و به تحمل بهتر خشکی کمک کرد (Sattar et al., 2023). در ذرت، تیمار ملاتونین ویژگی‌های آب برگ، از جمله محتوای نسبی آب را در شرایط خشکی شدید به‌میزان ۱۷ درصد افزایش داد (Gul et al., 2022). مطالعات نشان داده‌اند که براسینواسترینوئیدها نقش محوری در بهبود محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش خشکی ایفا می‌کنند. کاربرد خارجی براسینواسترینوئیدها توانایی نگهداری آب در گیاهان را افزایش داده و در نتیجه محتوای نسبی آب برگ را بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، تحقیقات در مورد گیاهان مختلف نشان داده است که تیمار با

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس صفات آنتی اکسیدانی و عملکرد دانه گیاه کینوا.

Table 3- Results of analysis of variance of antioxidant traits and quinoa seed yield.

| منابع تغییر<br>Source of variation    | درجه آزادی<br>Degree of freedom | کارتنوئید<br>Carotenoids<br>(mg g <sup>-1</sup> FW) | آنزیم آسکوربات<br>پراکسیداز<br>APX (μM min <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> protein) | آنزیم فنیل آلانین<br>آمونیا لیاز<br>PAL (μM min <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> protein) | عملکرد دانه<br>Grain Yield<br>(g m <sup>-2</sup> ) |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| سال<br>Year (Y)                       | 1                               | 418.80**                                            | 0.000008 <sup>ns</sup>                                                             | 29.53 <sup>ns</sup>                                                                     | 5143.46 <sup>ns</sup>                              |
| خطای Y<br>Error Y                     | 4                               | 37.59**                                             | 0.001**                                                                            | 7.38**                                                                                  | 676.02 <sup>ns</sup>                               |
| تنش<br>Drought (a)                    | 2                               | 7547.37**                                           | 0.68**                                                                             | 3277.66**                                                                               | 121464.71**                                        |
| a × Y                                 | 2                               | 26.73 <sup>ns</sup>                                 | 0.0006 <sup>ns</sup>                                                               | 16.99 <sup>ns</sup>                                                                     | 2043.42*                                           |
| خطای a<br>Error a                     | 8                               | 106.37**                                            | 0.007**                                                                            | 15.58**                                                                                 | 251.51 <sup>ns</sup>                               |
| محلول پاشی<br>Foliar application (b)  | 8                               | 169.18**                                            | 0.0001**                                                                           | 28.96**                                                                                 | 2754.57**                                          |
| Y × b                                 | 8                               | 4.04 <sup>ns</sup>                                  | 0.000003 <sup>ns</sup>                                                             | 0.44 <sup>ns</sup>                                                                      | 37.85 <sup>ns</sup>                                |
| a × b                                 | 16                              | 12.28**                                             | 0.00001*                                                                           | 2.74**                                                                                  | 1139.24**                                          |
| Y × a × b                             | 16                              | 2.91 <sup>ns</sup>                                  | 0.000009 <sup>ns</sup>                                                             | 0.37 <sup>ns</sup>                                                                      | 17.01 <sup>ns</sup>                                |
| خطا<br>Error                          | 96                              | 3.47                                                | 0.000008                                                                           | 0.42                                                                                    | 33.48                                              |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient variation | —                               | 3.19                                                | 0.87                                                                               | 2.69                                                                                    | 2.18                                               |

\*, \*\*, and <sup>ns</sup> are significant at 5% and 1% probability levels and non-significant, respectively.

شکل ۲- اثر متقابل تنش خشکی و تنظیم کننده های رشد روی نشت یونی برگ گیاه کینوا

Figure 2- Interaction of drought stress and growth regulators on ionic leakage in quinoa leaves

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری شده متأثر از تیمارهای مختلف آبیاری (خشکی)

Table 4- Means comparison of measured traits affected by different irrigation treatments (drought)

| آبیاری<br>Irrigation<br>(% of field capacity) | کلروفیل a<br>chlorophyll a<br>(mg g <sup>-1</sup> FW) |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 100 % FC                                      | 181.03a                                               |
| 75 % FC                                       | 174.87b                                               |
| 50 % FC                                       | 168.7c                                                |

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means in each column followed by the same letter(s) are not significantly different at the 5% probability level, according to Duncan's multiple range test

سهل‌الوصول به ترتیب افزایش ۳/۶۵ و ۷/۳۰ درصدی نسبت به شاهد نشان دادند (جدول ۴). محلول پاشی سبب افزایش میزان کلروفیل a گردید، به‌طوری‌که محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار میزان کلروفیل کل را ۵/۱۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد، اما تفاوت معنی‌داری با محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار نداشت (جدول ۵).

### کلروفیل b

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به میزان کلروفیل b حاکی از تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف محلول پاشی و اثرمتقابل تنش خشکی و محلول پاشی بر این پارامتر بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول پاشی بر کلروفیل b نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل b مربوط به تیمار محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول بود، به‌طوری‌که محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول سبب افزایش ۱۶/۲۵ درصدی میزان کلروفیل b نسبت به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول گردید.

کمترین میزان کلروفیل b مربوط به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۷۵ درصد رطوبت سهل‌الوصول بود که اختلاف معنی‌دار با تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول نداشت (شکل ۳).

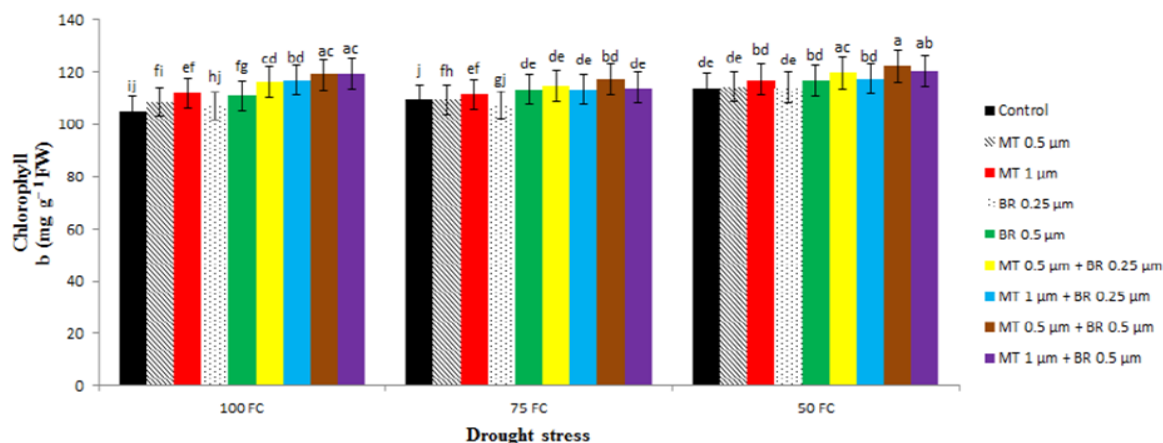
ملاتونین همچنین نقش مهمی در کاهش نشت یونی دارد که یک نشانگر معمول از آسیب غشایی تحت تنش خشکی است. در گیاه آلاله (*Ranunculus asiaticus*)، استفاده از ملاتونین نشت الکترولیت‌ها را به میزان ۱۴/۳ درصد کاهش داد، که نشان دهنده پایداری بیشتر غشا است (Eisa et al., 2023). در گندم، استفاده همزمان از سیلیکون و ملاتونین به‌طور قابل توجهی نشت الکترولیت‌ها را کاهش داد و نشان دهنده کاهش آسیب اکسیداتیو بود (Sattar et al., 2023).

در جو، استفاده از ملاتونین محتوای پراکسید هیدروژن و پراکسیداسیون لیپیدی را کاهش داد که منجر به کاهش نشت الکترولیت‌ها شد (Talaat, 2023).

به‌همین ترتیب در برنج، تیمار ملاتونین نشت الکترولیت‌ها را کاهش داد و به بهبود یکپارچگی غشا در شرایط خشکی کمک کرد (Silalert and Pattanagul, 2021). براسینواسستروئیدها به کاهش نشت یون که شاخص مهمی از یکپارچگی غشای سلولی است، کمک می‌کنند. این امر از طریق افزایش دفاع آنتی‌اکسیدانی و تثبیت غشاهای سلولی در شرایط تنش صورت می‌گیرد (Lou et al., 2024).

### کلروفیل a

در تحقیق انجام شده نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان کلروفیل a تحت تأثیر تنش خشکی و محلول پاشی قرار گرفت (در سطح احتمال یک درصد) (جدول ۲). با افزایش تنش خشکی میزان کلروفیل a نسبت به شاهد افزایش یافت به‌نحوی که تیمار شاهد با تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول تفاوت معنی‌داری نشان داد، به‌طوری‌که میزان کلروفیل a در دو سطح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت



شکل ۳- اثر متقابل تنش خشکی و تنظیم کننده های رشد روی کلروفیل b گیاه کینوا

Figure 3- Interaction of drought stress and growth regulators on chlorophyll b in quinoa plant

آنتی اکسیدانی نسبت داده می شود که به حفاظت از کلروفیل در برابر تخریب کمک می کند (Antoniou *et al.*, 2017). براسینواسستروئیدها نقش مهمی در افزایش محتوای کلروفیل و کارایی کلی فتوسنتز در انواع مختلف گیاهان از جمله گوجه فرنگی دارند. در گیاهان گوجه فرنگی، استفاده خارجی از براسینواسستروئیدها تحت شرایط تنش نوری بالا و پایین منجر به افزایش قابل توجهی در محتوای کلروفیل شد که برای رشد و توسعه گیاه بسیار مهم است (Yousuf *et al.*, 2024).

### کاروتنوئید

تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثر سال، تنش خشکی، محلول پاشی و اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی به طور معنی داری (در سطح احتمال یک درصد) میزان کاروتنوئید را تحت تاثیر قرار دادند (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش خشکی و محلول پاشی نشان داد که بیشترین میزان کاروتنوئید مربوط به تیمار محلول پاشی با ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول بود که اختلاف معنی داری با تیمارهای محلول پاشی با ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار و محلول پاشی با براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار نداشت. کمترین میزان کاروتنوئید مربوط به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول بود، به طوری که سبب کاهش ۴۳/۴۱ درصدی میزان کاروتنوئید نسبت به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول

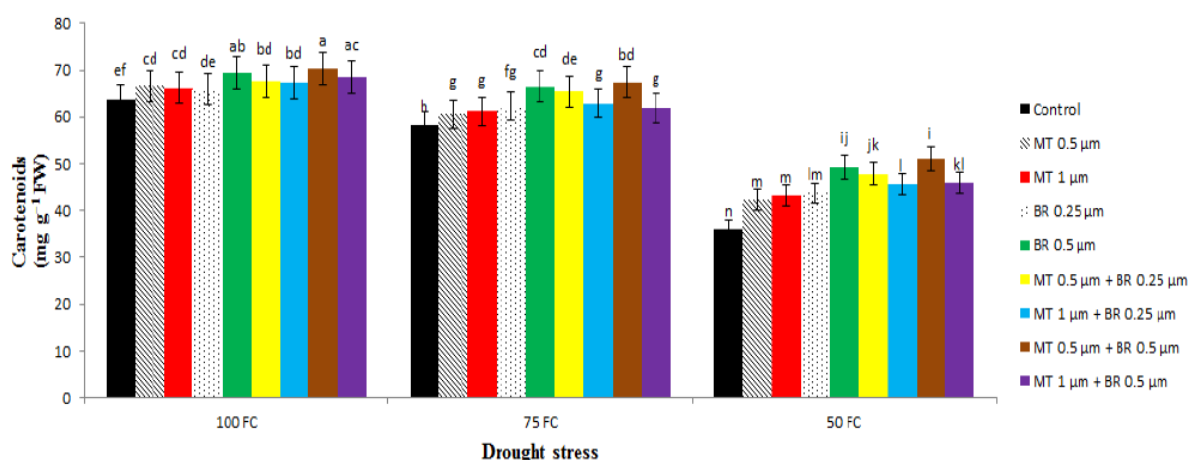
### کلروفیل a/b

نتایج به دست آمده بیانگر آن بود که سطوح مختلف محلول پاشی، میزان کلروفیل a/b را به طور معنی داری تحت تاثیر قرار داد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر محلول پاشی بر نسبت کلروفیل a/b نشان داد که بیشترین میزان نسبت کلروفیل a/b مربوط به تیمار عدم محلول پاشی بود که اختلاف معنی داری با تیمارهای محلول پاشی براسینواسستروئید ۰/۲۵ میکرومولار و محلول پاشی براسینواسستروئید ۰/۵ میکرومولار و محلول پاشی ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و محلول پاشی ملاتونین یک میکرومولار نداشت (جدول ۵). کلروفیل برای عملکردهای حیاتی گیاه از جمله فتوسنتز، جذب نور، پایداری غشای سلولی و انتقال انرژی، بسیار مهم است. تنش خشکی می تواند با آسیب رساندن به غشای تیلاکوئید، اختلال در تعادل متابولیک و مهار فعالیت فتوسنتزی، باعث کاهش قابل توجه رنگدانه های گیاهی (کلروفیل های a و b) شود و در نتیجه رشد گیاه را کاهش دهد (Munsif *et al.*, 2022). در مطالعات مختلف، کاربرد ملاتونین باعث افزایش سطح کلروفیل شده است که برای حفظ کارایی فتوسنتزی در شرایط تنش ضروری است. به عنوان مثال، تیمار با ملاتونین در ذرت و سویا در شرایط تنش خشکی موجب افزایش قابل توجهی در محتوای کلروفیل گردید که نشان دهنده نقش حفاظتی آن در حفظ رنگدانه های فتوسنتزی است (Gul *et al.*, 2022; Imran *et al.*, 2021).

این افزایش در محتوای کلروفیل به قابلیت ملاتونین در کاهش استرس اکسیداتیو و تقویت سیستم دفاعی

ملاتونین موجب افزایش سطح کاروتنوئیدها شده تنش کمک می‌کند (Muhammad et al., 2022; Ahmad et al., 2019). تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از براسینواسترنوئیدهای خارجی موجب افزایش تجمع کاروتنوئیدها در شرایط مختلف تنش محیطی می‌شود. به عنوان مثال، مطالعات نشان می‌دهند که تیمار با براسینواسترنوئیدها فعالیت آنزیم‌های کلیدی در مسیر بیوسنتز کاروتنوئیدها را افزایش می‌دهد و به این ترتیب سطوح بالاتری از این رنگدانه‌ها را در کینوا ترویج می‌کند (Yousuf et al., 2024).

گردید (شکل ۴). مطالعات انجام شده، کاهش کاروتنوئیدها تحت تنش خشکی را نشان می‌دهند. کاهش کاروتنوئیدها ممکن است به دلیل اکسید شدن توسط اکسیژن فعال یا تخریب ساختار آن‌ها باشد. به عنوان مثال، مطالعات روی زیتون نشان داده که محتوای کاروتنوئید با افزایش تنش خشکی کاهش می‌یابد (Ahmed et al., 2009). در شرایط تنش خشکی، استفاده از ملاتونین به افزایش محتوای کاروتنوئیدها منجر می‌شود که به حفاظت از سیستم فتوسنتزی در برابر آسیب‌های اکسیداتیو کمک می‌کند. در ذرت و سایر گیاهان، تیمار با



شکل ۴- اثر متقابل تنش خشکی و تنظیم‌کننده‌های رشد روی میزان کاروتنوئید گیاه کینوا

Figure 4- Interaction of drought stress and growth regulators on carotenoid content of quinoa plant

درصدی میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز نسبت به تیمار عدم محلول در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول گردید. همچنین کمترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز مربوط به تیمار عدم محلول‌پاشی و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد رطوبت سهل‌الوصول بود که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای محلول‌پاشی با ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسترنوئید ۰/۵ میکرومولار در آن سطح از آبیاری نداشت (شکل ۵). آنزیم آسکوربات پراکسیداز با استفاده از آسکوربات به عنوان منبع الکترون،  $H_2O_2$  را احیاء و آن را به آب تبدیل می‌کند. حذف  $H_2O_2$  سمی وظیفه اصلی آنزیم آسکوربات پراکسیداز است که گیاهان را از تنش اکسیداتیو محافظت می‌کند (Slabbert and Krüger, 2014). تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از ملاتونین باعث افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز و آنزیم آسکوربات پراکسیداز می‌شود و در نتیجه توانایی

این بهبود به‌ویژه در شرایط استرس‌زا مانند خشکی که براسینواسترنوئیدها به حفظ کارایی فتوسنتزی و حفاظت در برابر استرس اکسیداتیو کمک می‌کنند، اهمیت دارد (Zhou et al., 2024).

### فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX)

میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر تنش خشکی، محلول‌پاشی و اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۳). نتایج برهم‌کنش داده نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز افزوده شد. به‌طوری‌که بیشترین میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز مربوط به تیمار محلول‌پاشی با ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسترنوئید ۰/۵ میکرومولار بود که سبب افزایش ۲/۶۷

گیاهان در حذف گونه های فعال اکسیژن را بهبود می بخشد (Sofa et al., 2015). مطالعات نشان داده است که براسینواسنواستروئیدها (BRS)، با تنظیم سیستم دفاع آنتی اکسیدانی، تحمل گیاهان به تنش های غیرزیستی را بهبود می بخشد (Vardhini and Anjum, 2015). براسینواسنواستروئیدها قادرند فعالیت آنزیم های مختلف آنتی اکسیدانی، از جمله آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و پراکسیداز را افزایش دهند که این امر به محافظت از گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو کمک می کند (Vardhini and Anjum, 2015).

### فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز (PAL)

میزان فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز به طور معنی داری (در سطح احتمال یک درصد) تحت تاثیر تنش خشکی، محلول پاشی و اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی قرار گرفت (جدول ۳). روند تغییرات فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز نشان داد که با افزایش میزان شدت تنش خشکی بر میزان فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز افزوده شد، به نحوی که بیشترین میزان فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز از تیمارهای محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار و محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار و محلول پاشی ملاتونین یک میکرومولار در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول به دست آمد (شکل ۶). تحقیقات روی گیاه حنا در شرایط تنش خشکی نشان داد که فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز در شرایط تنش افزایش پیدا می کند (Chamani et al., 2025). تحقیقات نشان داده اند که استفاده از ملاتونین به صورت اسپری برگی می تواند فعالیت آنزیم فنیل آلانین آمونیا لیاز را در محصولات کشاورزی افزایش دهد. این امر منجر به افزایش تجمع ترکیبات فنلی می شود که به عنوان آنتی اکسیدان عمل کرده و از استرس اکسیداتیو ناشی از خشکی محافظت می کنند (Jafari and Shahsavari, 2021).

### عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد تنش خشکی، محلول پاشی، تنش خشکی × محلول پاشی و سال × تنش خشکی عملکرد گیاه

کینوا را به طور معنی داری تحت تاثیر قرار دادند (جدول ۳). میزان عملکرد به طور معنی داری تحت تاثیر اثر متقابل تنش خشکی و محلول پاشی قرار گرفت، به نحوی که بیشترین میزان عملکرد از تیمار ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول و محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار و محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار به دست آمد. در شرایط آبیاری ۷۵ درصد رطوبت سهل الوصول محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار سبب افزایش ۸/۵۰ درصدی میزان عملکرد نسبت به تیمار عدم محلول پاشی تنظیم کننده ی رشد در این سطح از آبیاری گردید. محلول پاشی ترکیب ملاتونین یک میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار سبب افزایش ۶۴/۹۷ درصدی میزان عملکرد نسبت به تیمار عدم محلول پاشی در سطح آبیاری ۵۰ درصد رطوبت سهل الوصول گردید که اختلاف معنی داری با محلول پاشی ترکیب ملاتونین ۰/۵ میکرومولار و براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار نداشت. عملکرد تیمار ملاتونین یک میکرومولار + براسینواسنواستروئید ۰/۵ میکرومولار در سطح تنش متوسط (آبیاری ۷۵ درصد رطوبت سهل الوصول) با عملکرد تیمار شاهد (عدم محلول پاشی و آبیاری در حد ۱۰۰ درصد رطوبت سهل الوصول) اختلاف معنی داری نداشت. این به طور ضمنی نشان دهنده این موضوع است که این تیمار تنظیم کننده رشد، توانایی بالا بردن کارایی مصرف آب در شرایط تنش متوسط و در نتیجه تولیدی معادل سطح نرمال آبیاری را داراست و می تواند در شرایط تنش متوسط به عنوان یک راهکار و یا استراتژی موثر مورد استفاده قرار گیرد (جدول ۶). ترکیب براسینواسنواستروئیدها و ملاتونین می تواند به یک اثر هم افزایی منجر شود که عملکرد و اجزای عملکرد محصولات را به طور مؤثرتری نسبت به هریک از هورمون ها به تنهایی افزایش می دهد. این هم افزایی احتمالاً به دلیل نقش های مکمل براسینواسنواستروئیدها در تقویت رشد و ملاتونین در محافظت در برابر استرس اکسیداتیو است. به عنوان مثال، نقش ملاتونین در افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و توانایی براسینواسنواستروئیدها در بهبود کارایی استفاده از آب می تواند به طور مشترک منجر به رشد بهتر گیاه و افزایش عملکرد در شرایط خشکی شود (Imran et al., 2021).

جدول ۵- مقایسه میانگین های ویژگی های اندازه گیری شده متأثر از محلول پاشی تنظیم کننده های رشد گیاه.

Table 5- Means comparison of measured traits affected by plat growth regulators spraying

| تنظیم کننده های رشد گیاه                  | a کلروفیل                              | a/b کلروفیل                              |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| Plant growth regulators ( $\mu\text{m}$ ) | chlorophyll a ( $\text{mg g}^{-1}$ FW) | chlorophyll a/b ( $\text{mg g}^{-1}$ FW) |
| شاهد                                      | 170.38d                                | 1.58a                                    |
| Control                                   |                                        |                                          |
| ملاتونین ۰.۵                              | 173.1cd                                | 1.56a                                    |
| Melatonin 0.5                             |                                        |                                          |
| ۱ ملاتونین                                | 175.88bc                               | 1.55ab                                   |
| Melatonin 1                               |                                        |                                          |
| براسینواستروئید ۰.۲۵                      | 172.7cd                                | 1.58a                                    |
| Brasinostroid 0.25                        |                                        |                                          |
| براسینواستروئید ۰.۵                       | 175.16bc                               | 1.54ac                                   |
| Brasinostroid 0.5                         |                                        |                                          |
| ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۲۵       | 174.47c                                | 1.49d                                    |
| Brasinostroid 0.25+ Melatonin 0.5         |                                        |                                          |
| ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۲۵         | 175.19bc                               | 1.51bd                                   |
| Brasinostroid 0.25+ Melatonin 1           |                                        |                                          |
| ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۵        | 179.08a                                | 1.5d                                     |
| Brasinostroid 0.5+ Melatonin 0.5          |                                        |                                          |
| ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۵          | 177.81ab                               | 1.5cd                                    |
| Brasinostroid 0.5+ Melatonin 1            |                                        |                                          |

در هر ستون میانگین هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.

Means in each column followed by the same letter(s) are not significantly different at the 5% probability level, according to Duncan's multiple range test

جدول ۶- مقایسه میانگین های اثرات متقابل محلول پاشی تنظیم کننده های رشد و تنش خشکی بر عملکرد کینوا

Table 6- Mean comparisons of interaction of plant growth regulators and drought stress on yield of Quinoa

| عملکرد                        | تنظیم کننده رشد                          | خشکی                      |
|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|
| Yield ( $\text{Kg ha}^{-2}$ ) | Plant growth regulator ( $\mu\text{m}$ ) | Drought (%field capacity) |
| 3020 ab                       | براسینواستروئید ۰.۲۵                     | 100                       |
|                               | Brasinostroid 0.25                       |                           |
| 3040ab                        | براسینواستروئید ۰.۵                      |                           |
|                               | Brasinostroid 0.5                        |                           |
| 2975 bc                       | ملاتونین ۰.۵                             |                           |
|                               | Melatonin 0.5                            |                           |
| 2999 ab                       | ملاتونین ۱                               |                           |
|                               | Melatonin 1                              |                           |
| 3036 ab                       | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۲۵      |                           |
|                               | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 0.5        |                           |
| 3020ab                        | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۲۵        |                           |
|                               | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 1          |                           |
| 3059 a                        | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۵       |                           |
|                               | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 0.5         |                           |
| 3060a                         | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۵         |                           |
|                               | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 1           |                           |
| 2977 bc                       | شاهد                                     |                           |
| 2764 f                        | براسینواستروئید ۰.۲۵                     |                           |
|                               | Brasinostroid 0.25                       |                           |
| 2848 de                       | براسینواستروئید ۰.۵                      |                           |
|                               | Brasinostroid 0.5                        |                           |
| 2752f                         | ملاتونین ۰.۵                             |                           |
|                               | Melatonin 0.5                            |                           |

ادامه جدول ۶- مقایسه میانگین های اثرات متقابل محلول پاشی تنظیم کننده های رشد و تنش خشکی بر عملکرد کینوا

Table 6 Continued- Mean comparisons of interaction of plant growth regulators and drought stress on yield of Quinoa

| عملکرد                       | تنظیم کننده رشد                     | خشکی                      |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Yield (Kg ha <sup>-2</sup> ) | Plant growth regulator (µm)         | Drought (%field capacity) |
| 2779ef                       | ملاتونین ۱                          | 75                        |
|                              | Melatonin 1                         |                           |
| 2838de                       | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۲۵ |                           |
|                              | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 0.5   |                           |
| 2865d                        | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۲۵   |                           |
|                              | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 1     |                           |
| 2893d                        | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۵  | 50                        |
|                              | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 0.5    |                           |
| 2908cd                       | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۵    |                           |
|                              | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 1      |                           |
| 2680g                        | شاهد                                |                           |
| 2054 l                       | براسینواستروئید ۰.۲۵                | 50                        |
|                              | Brasinostroid 0.25                  |                           |
| 2294 i                       | براسینواستروئید ۰.۵                 |                           |
|                              | Brasinostroid 0.5                   |                           |
| 2080 kl                      | ملاتونین ۰.۵                        |                           |
|                              | Melatonin 0.5                       |                           |
| 2164 j                       | ملاتونین ۱                          | 50                        |
|                              | Melatonin 1                         |                           |
| 2153j                        | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۲۵ |                           |
|                              | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 0.5   |                           |
| 2138 jk                      | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۲۵   |                           |
|                              | Brasinostroid 0.25+ Melatonin 1     |                           |
| 2345hi                       | ملاتونین ۰.۵ + براسینواستروئید ۰.۵  | 50                        |
|                              | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 0.5    |                           |
| 2374 h                       | ملاتونین ۱ + براسینواستروئید ۰.۵    |                           |
|                              | Brasinostroid 0.5+ Melatonin 1      |                           |
| 1439m                        | شاهد                                |                           |

\* میانگین هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی داری ندارند

Means followed by the same letter(s) are not significantly different at the 5% probability level, according to Duncan's multiple range test

مطالعات نشان داده اند که براسینواستروئید با کمک به تغذیه بهتر و راندمان بالاتر انتقال کربوهیدرات از منبع به مخزن، تعداد و وزن دانه را به طور مثبت تنظیم می کند (Wu et al., 2008).

### نتیجه گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که تنش خشکی به طور قابل توجهی بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کینوا تأثیر می گذارد. استفاده از ملاتونین و براسینواستروئید به عنوان تعدیل کننده های تنش، موجب بهبود محتوای نسبی آب برگ، کاهش نشست یونی و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی گردید. این ترکیبات همچنین به افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها کمک کردند که به نوبه خود می تواند به بهبود

تیمار اخیرالذکر (ملاتونین یک میکرومولار + براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار در سطح تنش متوسط) باعث افزایش آنزیم پراکسیداز و کاتالاز گردید که این آنزیم ها به محافظت از گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو کمک می کنند (Vardhini and Anjum, 2015). به طوری که عملکرد سلولی و شادابی کل گیاه در طول دوره خشکی حفظ شده و منجر به بهبود کارایی فتوسنتزی، نمود رشدی و عملکرد گردید. استفاده از ملاتونین می تواند تأثیر چشم گیری بر عملکرد دانه و شاخص برداشت در محصولات تحت تنش خشکی داشته باشد. در سویا، تیمار با ملاتونین باعث افزایش فعالیت آنزیم های مرتبط با متابولیسم کربن و نیتروژن شده و در نتیجه به تجمع بیشتر ماده خشک و بهبود عملکرد منجر گردید (Cao et al., 2023).

عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی منجر شود. نتایج نشان دهنده این است که کاربرد همزمان ملاتونین و براسینواسترینید در سطوح مختلف آبیاری، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای افزایش تحمل به تنش در گیاه کینوا مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، این تحقیق به درک بهتری از تعاملات بین هورمون‌های گیاهی و تنش‌های محیطی کمک کرده و می‌تواند به توسعه روش‌های کشاورزی پایدار در مناطق مستعد خشکی یاری رساند.

## References

- Ahmad, S., Kamran, M., Ding, R., Meng, X., Wang, H., Ahmad, I., Fahad, S. and Han, Q., 2019. Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings. *PeerJ*, 7, p.e7793. <https://doi.org/10.7717/peerj.7793>
- Ahmed, C. Ben, Rouina, B. Ben, Sensoy, S., Boukhris, M., Abdallah. and F. Ben., 2009. Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. *Environmental and Experimental Botany*, 67, pp.345–352. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.07.006>
- Al-Huqail, A.A., Saleem, M.H., Ali, B., Azeem, M., Mumtaz, S., Yasin, G., Marc, R.A. and Ali, S., 2023. Efficacy of priming wheat (*Triticum aestivum*) seeds with a benzothiazine derivative to improve drought stress tolerance. *Functional Plant Biology*, 50(11), pp.915–931. <https://doi.org/10.1071/fp22140>
- Antoniou, C., Chatzimichail, G., Xenofontos, R., Pavlou, J.J., Panagiotou, E., Christou, A. and Fotopoulos, V., 2017. Melatonin systemically ameliorates drought stress-induced damage in *Medicago sativa* plants by modulating nitro-oxidative homeostasis and proline metabolism. *Journal of Pineal Research*, 62(4), p.e12401. <https://doi.org/10.1111/jpi.12401>
- Anwar, A., Liu, Y., Dong, R., Bai, L., Yu, X. and Li, Y., 2018. The physiological and molecular mechanism of brassinosteroid in response to stress: A review. *Biological Research*, 51. <https://doi.org/10.1186/s40659-018-0195-2>
- Barooti, S., Edalat, M., Oveisi, M., Kazemeini, S.A. and Naderi, R., 2025. Does the exogenous application of brassinosteroids affect the photosynthetic, morphological characteristics, and THC concentrations of *Cannabis sativa* L. under drought stress? *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 46, p.100635. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2025.100635>
- Campos, P.S., Quartin, V., Ramalho, J.C., Nunes, M.A., 2003. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. plants. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), pp.283–292. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00833>
- Cao, L., Zou, J., Qin, B., Bei, S., Ma, W., Yan, B., Jin, X., Zhang, Y., 2023. Response of exogenous melatonin on transcription and metabolism of soybean under drought stress. *Physiologia Plantarum*, 175(5), p.e14038. <https://doi.org/10.1111/ppl.14038>
- Chamani, F., Farahbakhsh, H., Naser Alavi, S.M., Pasandi Pour, A., 2025. Salicylic Acid and Sodium Nitroprusside Improve the Drought Tolerance of Henna (*Lawsonia inermis* L.) by Modulating Its Physiological

- and Biochemical Characteristics. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(1), pp.1830-1854. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02240-2>
- Corell, M., Garcia, M.C., Contreras, J.I., Segura, M.L., Cermeño, P., 2012. Effect of Water Stress on *Salvia officinalis* L. Bioproductivity and Its Bioelement Concentrations. *Communications in Soil Science and Plant analysis*, 43, pp.419–425. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.641811>
- Eisa, E.A., Honfi, P., Tilly-Mándy, A., Gururani, M.A., 2023. Exogenous application of melatonin alleviates drought stress in *Ranunculus asiaticus* by improving its morphophysiological and biochemical attributes. *Horticulturae*, 9(2), p.262 <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020262>
- El-Yazied, A.A., Ibrahim, M.F.M., Ibrahim, M.A.R., Nasef, I.N., Al-Qahtani, S.M., Al-Harbi, N.A., Alzuair, F.M., Alaklabi, A., Dessoky, E.S., Alabdallah, N.M., Omar, M.M.A., Ibrahim, M.T.S., Metwally, A.A., Hassan, K.M. and Shehata, S.A., 2022. Melatonin mitigates drought induced oxidative stress in potato plants through modulation of osmolytes, sugar metabolism, ABA homeostasis and antioxidant enzymes. *Plants*, 11(9), p.1151. <https://doi.org/10.3390/plants11091151>
- Encina-Zelada, C., Cadavez, V., Pereda, J., Gómez-Pando, L., Salvá-Ruiz, B., Teixeira, J.A., Ibañez, M., Liland, K.H. and Gonzales-Barron, U., 2017. Estimation of composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grains by Near-Infrared Transmission spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 79, pp.126–134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.026>
- Er-Rqaibi, S., Lyamlouli, K., El Yacoubi, H. and El Boukhari, M.E.M., 2025. Effect of crude extract and polysaccharides derived from *Fucus spiralis* on radish plants *Raphanus sativus* L. agrophysiological traits under drought stress. *BMC Plant Biology*, 25, 46. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-06023-2>
- Fuentes, F. and Paredes-Gonzalez, X., 2015. Nutraceutical perspectives of quinoa: biological properties and functional applications. *FAO and CIRAD: state of the art report of quinoa in the world in*, pp.286–299.
- Gul, N., Haq, Z.U., Ali, H., Munsif, F., Hassan, S.S. ul, Bungau, S., 2022. Melatonin Pretreatment Alleviated Inhibitory Effects of Drought Stress by Enhancing Anti-Oxidant Activities and Accumulation of Higher Proline and Plant Pigments and Improving Maize Productivity. *Agronomy*, 12(10), p.2398. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102398>
- Imran, M., Latif Khan, A., Shahzad, R., Aaqil Khan, M., Bilal, S., Khan, A., Kang, S.M. and Lee, I.J., 2021. Exogenous melatonin induces drought stress tolerance by promoting plant growth and antioxidant defence system of soybean plants. *AoB Plants*, 13(4), p.plab026. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab026>
- Jafari, M. and Shahsavari, A., 2021. The effect of foliar application of melatonin on changes in secondary metabolite contents in two citrus species under drought stress conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, p.692735. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.692735>
- Kováčik, J. and Klejdus, B., 2012. Tissue and method specificities of phenylalanine ammonia-lyase assay. *Journal of Plant Physiology*, 169, pp.1317–1320. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.04.008>
- Kuppusamy, A., Alagarswamy, S., Karuppusami, K.M., Maduraimuthu, D., Natesan, S., Ramalingam, K., Muniyappan, U., Subramanian, M. and Kanagarajan, S., 2023. Melatonin enhances the photosynthesis and

- antioxidant enzyme activities of mung bean under drought and high-temperature stress conditions. *Plants*, 12(13), p.2535. <https://doi.org/10.3390/plants12132535>
- Lichtenthaler, H.K. and Wellburn, A.R., 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transaction*, 11, pp.591–592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Lou, S., Jiang, H., Li, J., Tian, L., Du, M., Ma, T., Zhang, L. and Zhang, P., 2024. Effects of exogenous brassinosteroid and reduced leaf source on source–Sink relationships and boll setting in Xinjiang cotton. *Agronomy*, 14(6), p.1168. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061168>
- Luo, C., Min, W., Akhtar, M., Lu, X., Bai, X., Zhang, Y., Tian, L. and Li, P., 2022. Melatonin enhances drought tolerance in rice seedlings by modulating antioxidant systems, osmoregulation, and corresponding gene expression. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20), p.12075. <https://doi.org/10.3390/ijms232012075>
- Mansori, M., Chernane, H., Latique, S., Benaliat, A., Hsissou, D. and El Kaoua, M., 2015. Seaweed extract effect on water deficit and antioxidative mechanisms in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Applied Phycology*, 27, pp.1689–1698. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0455-7>
- Muhammad, I., Yang, L., Ahmad, S., Mosaad, I.S.M., Al-Ghamdi, A.A., Abbasi, A.M. and Zhou, X.B., 2022. Melatonin application alleviates stress-induced photosynthetic inhibition and oxidative damage by regulating antioxidant defense system of maize: A meta-analysis. *Antioxidants*, 11(3), p.512. <https://doi.org/10.3390/antiox11030512>
- Munsif, F., Shah, T., Arif, M., Jehangir, M., Afridi, M.Z., Ahmad, I., Jan, B.L. and Alansi, S., 2022. Combined effect of salicylic acid and potassium mitigates drought stress through the modulation of physio-biochemical attributes and key antioxidants in wheat. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(6), p.103294. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103294>
- Nakano, Y. and Asada, K., 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22, pp.867–880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- Nawaz, F., Naeem, M., Zulfiqar, B., Akram, A., Ashraf, M.Y., Raheel, M., Shabbir, R.N., Hussain, R.A., Anwar, I. and Aurangzaib, M., 2017. Understanding brassinosteroid-regulated mechanisms to improve stress tolerance in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp.15959–15975. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9163-6>
- Pereira, E., Encina-Zelada, C., Barros, L., Gonzales-Barron, U., Cadavez, V., C.F.R. Ferreira, I., 2019. Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food. *Food Chemistry*, 280, pp.110–114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.068>
- Rehman, A., Shahzad, B., Haider, F.U., Ibraheem Ahmed, H.A., Lee, D.J., Im, S.Y., Khan, I., 2022. An Introduction to Brassinosteroids. In *Brassinosteroids in plant developmental biology and stress tolerance*. pp.1–14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813227-2.00006-0>

- Rodríguez Gómez, M.J., Matías Prieto, J., Cruz Sobrado, V. and Calvo Magro, P., 2021. Nutritional characterization of six quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) varieties cultivated in Southern Europe. *Journal of Food Composition and Analysis*, 99, p.103876. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103876>
- Sánchez, F.J., Manzanares, M., De Andres, E.F., Tenorio, J.L. and Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Research*, 59, pp.225–235. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(98\)00125-7](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00125-7)
- Sattar, A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Hussain, S., Rasheed, U., Hussain, J., Al-Qahtani, S.M., Al-Harbi, N.A., Mahmoud, S.F. and Ibrahim, M.F.M., 2023. Modulation of antioxidant defense mechanisms and morpho-physiological attributes of wheat through exogenous application of silicon and melatonin under water deficit conditions. *Sustainability*, 15(9), p.7426. <https://doi.org/10.3390/su15097426>
- Silalert, P. and Pattanagul, W., 2021. Foliar application of melatonin alleviates the effects of drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49, pp.1–13. <https://doi.org/10.15835/nbha49312417>
- Slabbert, M.M. and Krüger, G.H.J., 2014. Antioxidant enzyme activity, proline accumulation, leaf area and cell membrane stability in water stressed *Amaranthus* leaves. *South African Journal of Botany*, 95, pp.123–128. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.08.008>
- Sofo, A., Scopa, A., Nuzzaci, M. and Vitti, A., 2015. Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, pp.13561–13578. <https://doi.org/10.3390/ijms160613561>
- Talaat, N.B., 2023. Drought stress alleviator melatonin reconfigures water-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.) plants' photosynthetic efficiency, antioxidant capacity, and endogenous phytohormone profile. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), p.16228. <https://doi.org/10.3390/ijms242216228>
- Vardhini, B. V. and Anjum, N.A., 2015. Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, 2, p.67. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00067>
- Wu, C.Y., Trieu, A., Radhakrishnan, P., Kwok, S.F., Harris, S., Zhang, K., Wang, J., Wan, J., Zhai, H., Takatsuto, S., Matsumoto, S., Fujiok, S., Feldmann, K.A. and Pennell, R.I., 2008. Brassinosteroids regulate grain filling in rice. *The Plant Cell*, 20, pp.2130–2145. <https://doi.org/10.1105/tpc.107.055087>
- Yousuf, W., Bhat, S.A., Bashir, S., Rather, R.A., Panigrahi, K.C. and John, R., 2024. Brassinosteroid improves light stress tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum*) by regulating redox status, photosynthesis and photosystem II. *Functional Plant Biology*, 51(12), p.fp24170. <https://doi.org/10.1071/fp24170>
- Zhao, Q., Zheng, X., Wang, C., Wang, Q., Wei, Q., Liu, X., Liu, Y., Chen, A., Jiang, J., Zhao, X., He, T., Qi, J., Han, Y., Qin, H., Xie, F. and Chen, Y., 2025. Exogenous melatonin improves drought tolerance by regulating the antioxidant defense system and photosynthetic efficiency in fodder soybean seedlings. *Plants*, 14(3), p.460. <https://doi.org/10.3390/plants14030460>

- Zhou, Y.L., You, X.Y., Wang, X.Y., Cui, L.H., Jiang, Z.H. and Zhang, K.P., 2024. Exogenous 24-epibrassinolide enhanced drought tolerance and promoted BRASSINOSTEROID-INSENSITIVE2 expression of quinoa. *Plants*, 13(6), p.873. <https://doi.org/10.3390/plants13060873>
- Zhu, L., Li, A., Sun, H., Li, P., Liu, X., Guo, C., Zhang, Y., Zhang, K., Bai, Z., Dong, H., Liu, L. and Li, C., 2023. The effect of exogenous melatonin on root growth and lifespan and seed cotton yield under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 204, p.117344. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117344>