Journal of Abiotic Stress in Horticultural Crops
https://jabssh.znu.ac.ir

Research Article
Vol. 1, No. 1, Autumn and Winter 2026, p. 53-64

Comparison of zearalenone and nanozeolite capability on germination and physiological indices improvement of Arugula *(Eruca sativa* L.*)* under drought stress

Fatemeh Galehdari [1], Najmeh Zeinalipour [*2], Mohammad Javad Arvin [3] & Mehdi Sarcheshmehpour [4]

1 - Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2 - Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
3 - Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
4 - Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
(*- Corresponding author's Email: Nzeinali@uk.ac.ir)

Received: 17 September 2025
Received in revised form: 30 October 2025
Accepted: 01 November 2025

How to cite this article:
Galehdari, F., Zeinalipour, N., Arvin, M. and Sarcheshmehpour, M. (2026). Comparison of zearalenone and nanozeolite capability on germination and physiological indices improvement of Arugula (*Eruca sativa* L.) under drought stress. *Journal of Abiotic Stress in Horticultural Crops*, *1*(1), 53-64. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.30470/ashc.2026.742863

Introduction

To investigate the effect of water deficit stress and seed priming treatments with zearalenone (ZEN) and nanozeolite (NZ) injection on germination components, initial growth, and physiological and morphological indices of arugula or rocola (*Eruca sativa* L.), a factorial experiment was conducted in a split-plot design with three replications in the research greenhouse of Shahid Bahonar University of Kerman. The main treatment consisted of two irrigation levels (full irrigation equivalent to 100% field capacity and water deficit stress equivalent to 70% field capacity). The sub-treatments included seed priming with two concentrations of zearalenone (60 and 120 microliters per liter), injection of two levels of ZEN (1.5 and 3 milligrams per kilogram of soil), and a control treatment (no treatment). Arugula is a Mediterranean leafy vegetable with high nutritional value, rich in antioxidants, vitamins A, C, K, and calcium. Under water deficit stress, it experiences reduced germination, leaf area, biomass, and yield. Drought stress disrupts physiological processes, increases reactive oxygen species (ROS), and reduces photosynthesis, thereby threatening food security. Zearalenone, a mycotoxin with plant growth-regulating properties (gibberellin- and auxin-like), and nanozeolite, due to its porous structure and high cation exchange capacity, have the potential to improve plant tolerance to abiotic stresses. This study aimed to evaluate the effects of these novel compounds on the germination and initial growth parameters of arugula.

Methods

The research was conducted in 2023–2024 (1402) in a greenhouse with day/night temperatures of 27/15°C, using a growing medium composed of cocopeat, perlite, peat moss, and bentonite. F1 arugula seeds were sown, and stress was applied from the day after sowing. Treatments included seed priming with ZEN and nanozeolite injection into the soil. Measured parameters included germination percentage (on days 3 and 6), mean germination time (MTG), seedling vigor index, initial and final leaf area, stem length, shoot dry weight, fresh and dry root weight, leaf proline content, and vegetative yield. Statistical analysis was performed using the split-plot design and LSD test.

Results and Discussion

The results of this study showed that the zearalenone treatment at 120 microliters per liter produced the shortest time to reach maximum germination percentage under both irrigation conditions (100% and 70% field

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).
https://doi.org/10.30470/ashc.2026.742863

capacity) (2.4 days). This treatment also recorded the highest germination percentage on the third and sixth days after sowing under full irrigation (100% field capacity). Regarding seedling growth indices, the 120 µl/L zearalenone treatment recorded the highest seedling vigor index (4.67) and the greatest initial leaf area (34.7 cm²). The final leaf area was affected by the interaction of irrigation and treatments, with the highest value (86.7 cm²) observed under full irrigation combined with 120 µl/L zearalenone. Under water deficit stress (70% field capacity), the 1.5 mg/kg nanozeolite treatment performed best and produced the highest final leaf area (86.5 cm²). Stem length was significantly affected by the treatments, with the greatest stem length (13.03 cm) obtained under normal irrigation and 120 µl/L zearalenone. The interaction effect of irrigation and treatments on shoot dry weight was also significant. The highest shoot dry weight was recorded under 100% field capacity irrigation with 120 µl/L zearalenone (470 mg), followed by the 3 mg/kg nanozeolite treatment (461 mg). The results are consistent with previous studies showing that ZEN improves PSII photochemical activity, membrane integrity, and antioxidant metabolism, while NZ reduces the effects of drought stress by increasing soil water and nutrient retention. The positive interaction of these treatments with irrigation levels confirms their potential for use in sustainable agriculture. The increase in proline highlights its protective role in osmotic regulation and reduction of oxidative damage.

Conclusions

Seed priming with zearalenone, especially at 120 microliters per liter, along with nanozeolite application, accelerates the germination process, improves seedling vigor and vegetative growth indices, and mitigates the negative effects of water deficit stress in arugula. These compounds, as novel biological strategies, are suitable options for managing drought stress in leafy vegetables in arid and semi-arid regions. Future field studies are recommended to confirm these results.

Keywords: Zearalenone, seedling vigor index, Rocola dayton, proline, Nano zeolite.

نشریه تنش‌های غیر زیستی در محصولات باغبانی
https://jabssh.znu.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۵، ص. ۵۳ – ۶۴

مقایسه توانمندی زئارالنون و نانوزئولیت بر بهبود مؤلفه‌های جوانه‌زنی و شاخص‌های فیزیولوژیکی روکولا (*Eruca sativa* L.) تحت تنش کم‌آبی

فاطمه گله‌داری، نجمه زینلی‌پور*، محمدجواد آروین، مهدی سرچشمه‌پور

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۰

چکیده

به‌منظور بررسی تأثیر تنش کم‌آبی و تیمارهای پرایمینگ بذر با زئارالنون و تزریق نانوزئولیت بر جوانه‌زنی، رشد اولیه و شاخص‌های مورفولوژیکی گیاه روکولا (*Eruca sativa* L.)، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح اسپلیت‌پلات با سه تکرار اجرا شد. تیمار اصلی شامل دو سطح آبیاری (آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و تنش کم‌آبی معادل ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) بود و تیمارهای فرعی شامل پرایمینگ بذر با دو غلظت زئارالنون (ZEN) (۶۰ و ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر) و تزریق دو سطح نانوزئولیت (NZ) (۱/۵ و ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) به همراه تیمار شاهد بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار زئارالنون در غلظت ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر، کوتاه‌ترین زمان لازم برای رسیدن به حداکثر درصد سبز شدن را در هر دو شرایط آبیاری (۱۰۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) ایجاد کرد (۴/۲ روز). این تیمار همچنین در روزهای سوم و ششم پس از کشت، بالاترین درصد جوانه‌زنی را در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) به خود اختصاص داد. از نظر شاخص‌های رشد گیاهچه، تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر، بالاترین شاخص بنیه گیاهچه (۴/۶۷) و بیشترین سطح برگ اولیه (۳۴/۷ سانتی‌متر مربع) را ثبت کرد. سطح برگ نهایی نیز تحت تأثیر متقابل آبیاری و تیمارها قرار گرفت؛ به‌طوری که بیشترین مقدار آن (۸۶/۷ سانتی‌متر مربع) در تیمار آبیاری کامل همراه با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر مشاهده شد. در شرایط تنش کم‌آبی (۷۰ درصد ظرفیت زراعی)، تیمار نانوزئولیت ۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بهترین عملکرد را داشت و بیشترین سطح برگ نهایی (۸۶/۵ سانتی‌متر مربع) را تولید کرد. طول ساقه نیز به‌طور معناداری تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت و بیشترین طول ساقه (۱۳/۳ سانتی‌متر) در شرایط آبیاری نرمال و تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر به دست آمد. اثر متقابل آبیاری و تیمارهای مورد مطالعه بر وزن خشک بوته نیز معنادار بود. بیشترین وزن خشک بوته در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر (۴۷۰ میلی‌گرم) و به دنبال آن، تیمار نانوزئولیت ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۴۶۱ میلی‌گرم) ثبت گردید. در مجموع، نتایج این پژوهش حاکی از آن است که پرایمینگ بذر با زئارالنون (به‌ویژه غلظت ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر) و کاربرد نانوزئولیت می‌توانند به‌طور مؤثری فرایند جوانه‌زنی را تسریع کنند، شاخص‌های بنیه گیاهچه را بهبود بخشند و رشد رویشی گیاه روکولا را در شرایط تنش کم‌آبی تقویت نمایند؛ بنابراین، این دو ماده می‌توانند به‌عنوان راهکارهای زیستی و نوین در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهان زراعی، به‌خصوص روکولا، مورد توجه قرار گیرند.

کلمات کلیدی: زئارالنون، شاخص بنیه گیاهچه، روکولا دایتون، پرولین، نانو زئولیت

مقدمه

روکـولا *Eruca vesicaria* ازجملـه سـبزی‌هـای برگـی مدیترانه‌ای با طعـم تنـد فنـدق‌ماننـد از خـانواده براسیکاسـه و منبعی غنی از مواد مغذی سرشار از آنتی‌اکسـیدان‌هـایی ماننـد ویتامین‌های A و C است که به مقابلـه بـا اسـترس اکسـیداتیو کمک و به دلیل دارا بودن ویتامین K و کلسیم، از اسـتخوان‌هـا حمایت می‌کند و مؤثر در ممانعت از بروز پوکی استخوان اسـت (Jilani *et al*., 2015). تنش آبی و کمبود آب از چـالش‌هـای اساسی هستند که امنیت غذایی جهـانی و تولیـد سـبزیجات را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تنش خشکی کـه یکـی از پیامـدهای کمبود آب اسـت، مکانیسـم‌هـای فیزیولـوژیکی، بیوشـیمیایی و مولکولی گیاهان را مختل مـی‌کنـد و باعـث کـاهش عملکـرد و کیفیت محصولات می‌شود؛ برای مثال، تنش خشکی مـی‌توانـد موجـب پیـری بـرگ‌هـا، کـاهش کـارایی فتوسـنتز و افـزایش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از گونه‌های فعال اکسـیژن (ROS) شود (Oguz *et al*., 2022). مطالعات پیش‌بینی می‌کننـد کـه کمبود آب می‌تواند تا سال ۲۰۵۰ تولیـد جهـانی غـذا را تـا ۱۴ درصد کاهش دهد. این کاهش تولید، ناامنی غذایی را به‌ویژه در مناطقی که با رشد بالای جمعیـت و منـابع محـدود آب مواجـه هستند، تشدید مـی‌کنـد (FAO, 2023). بـرای مقابلـه بـا ایـن چالش‌ها، استراتژی‌های نوآورانه‌ای در حال توسعه هسـتند کـه شامل سیستم‌های آبیاری دقیق، گونه‌های مقـاوم بـه خشـکی و استفاده از محرک‌های زیستی می‌شوند که کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهند و مقاومت گیاهان را بهبود می‌بخشند.

تنش آبی به‌طـور منفـی بـر رشـد و عملکـرد سـبزیجات برگ‌دار تأثیر می‌گـذارد و معمـولاً باعـث کـاهش سـطح بـرگ، محتوای کلروفیل و کل بیوماس می‌شود که این امر بـر کیفیـت تغذیـه‌ای تـأثیر مـی‌گـذارد. اسـتفاده از ترکیبـات بیولـوژیکی به‌صورت محلول‌پاشی، مانند عصاره‌های جلبک دریایی، زئولیت، اسیدهای هیومیک و آمینواسـیدها، مـی‌توانـد ایـن اثـرات را بـا افزایش تاب‌آوری گیاه و فرایندهای فیزیولوژیکی کـاهش دهـد. این بیومحرک‌ها فعالیت آنـزیم‌هـای آنتـی‌اکسـیدان را افـزایش می‌دهند و به کاهش اسـترس اکسـیداتیو ناشـی از کمبـود آب کمک می‌کنند (Chutia and Borah, 2012). مطالعات نشـان می‌دهند که این ترکیبات می‌توانند محتوای آب نسبی، غلظـت کلروفیل و عملکـرد گیـاه را بهبـود بخشـند. تیمارهـایی ماننـد کائولین و کیتوزان در حفظ سطوح کلروفیل و افزایش رشـد در شرایط خشکی مؤثر بوده‌اند. به‌طور کلـی، اسـتفاده از ترکیبـات بیولوژیکی به‌عنوان درمان‌های محلول‌پاشی، اسـتراتژی‌ای قابـل اجرا برای حفظ تولید در سبزیجات برگ‌دار در مواجهه با تـنش آبی است. تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی نرخ‌های کاربرد و درک تعاملات بین بیومحرک‌های مختلف و پاسـخ‌هـای گیـاهی مورد نیاز است. مطالعات نشان داده‌انـد کـه اسـتفاده از زئولیـت می‌تواند به‌طور قابل توجهی پارامترهای رشد مانند ارتفاع گیـاه، وزن خشک و توسعه ریشه را در شـرایط تـنش خشـکی بهبـود بخشـد؛ بـرای مثـال، گیاهـان تیمارشـده بـا زئولیـت، محتـوای کلروفیل و کارایی فتوسنتزی بهتری را نشـان دادنـد کـه بـرای حفـظ رشـد در شـرایط کمبـود آب حیـاتی اسـت. زئولیـت‌هـا به‌عنوان اصلاح‌کننده‌هـای خـاک عمـل مـی‌کننـد کـه کـارایی استفاده از آب و مواد مغذی را افزایش می‌دهند. آن‌ها می‌توانند آب و مواد مغذی را جذب و به‌آرامی به گیاهـان آزاد کننـد کـه این امر، به‌ویژه در مناطق خشـک و نیمـه‌خشـک، مفیـد اسـت (Antonoglou *et al*., 2025).

نانوذرات (NPs)، ماننـد نـانوذرات سـیلیکا و آهـن، نشـان داده‌اند که می‌توانند تحمل به خشـکی را در گیاهـان بـا بهبـود شاخص‌های رشد و بیوماس افزایش دهند. آن‌ها به بهبود جذب آب و مواد مغذی کمک می‌کننـد کـه در دوره‌هـای کمبـود آب حیاتی است؛ برای مثال، مطالعات نشـان داده‌انـد کـه نـانوذرات می‌توانند به‌طور قابل توجهی سطح پرولین، وزن خشک ریشـه، ساقه و همچنین رشد کلـی گیـاه را در شـرایط تـنش خشـکی افزایش دهند. از سویی، کاربرد برخی از ایـن ترکیبـات زیسـتی نیز بر پارامترهای جوانه‌زنی محصولات باغی و زراعی تأثیرگـذار است؛ برای مثال، با آگاهی از مؤلفه یـا شـاخص زمـان حـداکثر جوانه‌زنی یا MTG، کشـاورزان مـی‌تواننـد بـذرهایی را انتخـاب کنند که سریع‌تر و یکنواخت‌تـر جوانـه مـی‌زننـد کـه ایـن امـر می‌تواند به افزایش عملکرد محصول کمک کند. دانسـتنMTG به کشاورزان این امکان را می‌دهد که زمان مناسب برای کاشت را تعیین و از تأخیر در جوانه‌زنـی جلـوگیری کننـد. درک ایـن مؤلفه به کشاورزان کمک می‌کند تا بذرهای مناسب را انتخاب و زمان کاشت را بهینه‌سـازی کننـد کـه در نهایـت مـی‌توانـد بـه افزایش عملکرد و بهره‌وری در کشاورزی منجر شود (Reed *et al*., 2022). ترکیـب تنظـیم‌کننـده‌هـای رشـد و نانوترکیبـات می‌تواند به افزایش تاب‌آوری به خشکی منجـر شـود. تحقیقـات نشان می‌دهند که کاربرد هم‌زمان آن‌هـا مـی‌توانـد پاسـخ‌هـای فیزیولوژیکی را بهبود بخشد؛ مانند افزایش محتوای کلروفیـل و کاهش استرس اکسیداتیو کـه بـه نوبـه خـود، رشـد و عملکـرد بهتری را در شرایط محدودیت آب ترویج می‌کند (Elsaadony *et al*., 2022).

نانوذرات با بهبود یکپارچگی غشای سلولی، تنظیم تعادل آب و القای بیان ژن‌های پاسخ‌دهنده به خشکی، مکانیسم‌های دفاعی گیاه را در برابر تنش خشکی تقویت می‌کنند. این تنظیم به گیاهان کمک می‌کند تا با اثرات منفی کمبود آب مقابله کنند و در نتیجه، تحمل استرس بهبود یابد. زئولیت‌ها، آلومینوسیلیکات‌های بلوری و هیدراته، فلزاتی قلیایی هستند که شبکه‌هایی سه‌بعدی متشکل از چهار وجهی‌های مولکولی دارند. این مواد بهبود ساختار خاک را فراهم می‌کنند و ماندگاری کود را در ناحیه توسعه ریشه افزایش می‌دهند. همچنین با ساختار متخلخل و سطح داخلی وسیع خود، عناصر غذایی را تثبیت و از طریق رهاسازی تدریجی آن‌ها، فراهمی درازمدت این عناصر را برای گیاهان ایجاد می‌کنند (Li *et al*., 2025).

زئارالنون (ZEN)، مایکوتوکسینی تولیدشده توسط گونه‌های فوزاریوم، به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد گیاهی شناسایی شده است که می‌تواند تحمل به خشکی را در ماش و نخودفرنگی افزایش دهد. این ترکیب توسعه ریشه را ترویج می‌کند و سطح آنتی‌اکسیدان‌ها را افزایش می‌دهد که به کاهش استرس اکسیداتیو در شرایط خشکی کمک می‌کند (Dziurka *et al*., 2021). تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از زئارالنون می‌تواند کارایی فتوسنتزی و کارایی استفاده از آب (WUE) را در گیاهان بهبود بخشد؛ برای مثال، در آروگولا، این ترکیب به‌طور قابل توجهی فتوسنتز خالص را افزایش و نشت الکترولیت را در شرایط تنش خشکی کاهش داد که نشان‌دهنده بهبود یکپارچگی غشای سلولی و سلامت کلی گیاه است (Zeinalipour *et al*., 2025).

ترکیب ZEN و نانوزئولیت، نتایج امیدوارکننده‌ای در افزایش تحمل به خشکی نشان داده است. مطالعات نشان می‌دهند که این ترکیب می‌تواند منجر به افزایش تجمع پرولین، بهبود محتوای کلروفیل و بهبود قدرت کلی گیاه در شرایط محدودیت آب شود (Zeinalipour *et al*., 2025). اثری محافظتی از ZEN بر فعالیت فتوشیمیایی PSII و رشد در گندم و سویا در معرض تنش شوری گزارش گردیده است (Kościelniak *et al*., 2011). در تحقیقی متفاوت، کاربرد زئارالنون در غلظت ۴ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان تیمار بذری منجر به افزایش فعالیت فتوشیمیایی فتوسیستم II در پروسه فتوسنتز دو گیاه گندم و ماش تحت تنش شوری شد و از این طریق، آسیمیلاسون دی‌اکسید کربن بهبود یافت (Apolonia *et al*., 2021; Kościelniak *et al*., 2011). در بررسی تأثیر گابا (گاما آمینوبوتیریک‌اسید) بر گوجه‌فرنگی، بیشترین میزان سنتز کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنویید و پرولین در برگ گیاه در غلظت ۲ میلی‌گرم بر لیتر گابا و نیز تولید بیشترین وزن تر برگ در غلظت ۱ میلی‌گرم بر لیتر این اسیدآمینه مشاهده شد (Shoaib *et al*., 2025). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد خارجی ملاتونین به‌عنوان پلی‌آمین تعدیل‌کننده اثرات تنش در گیاه برنج است و منجر به افزایش پرولین می‌شود (Chutia and Borah, 2012).

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی سبزی‌کاری دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. میانگین دمای گلخانه در طول روز، ۲۷ درجه سانتی‌گراد و در شب، ۱۵ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۶۵ درصد ثبت گردید. شدت نور در کانوپی و محیط اطراف گیاهان به‌طور میانگین ۴۳۸۰ لوکس اندازه‌گیری شد. بستر کشت مورد استفاده ترکیبی از کوکوپیت، پرلیت، پیت ماس و بنتونیت با نسبت‌های ۶۰٪، ۲۵٪، ۱۴٪ و ۱٪ بود که به‌صورت همگن تهیه و در گلدان‌های پلاستیکی با ارتفاع دیواره ۲۰ سانتی‌متر و قطر دهانه ۶ سانتی‌متر قرار گرفت. بذور F1 گیاه آروگولا از کمپانی روکالبای اسپانیا خریداری و در مهر ماه ۱۴۰۲ در عمق ۱/۵ سانتی‌متری بستر کشت، کاشته شدند. گیاهچه‌ها در دو مرحله با محلول هوگلند تغذیه شدند و آبیاری روزانه در ساعت ۹ صبح انجام می‌گرفت. تنش کم‌آبی از روز پس از کشت بذور آغاز شد و آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات با دو سطح آبیاری (۱۰۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی) و تیمارهای بذر و غنی‌سازی بستر کشت طراحی شد. برای برآورد زمان‌های آبیاری مجدد و حجم آب مصرفی، از روش توزین بستر کشت استفاده شد. همچنین برای تعیین ظرفیت زراعی، سینی‌های کشت به وضعیت اشباع رسیدند و درصد رطوبت وزنی خاک محاسبه شد. تیمارهای آبیاری شامل آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه و ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه بودند. تیمارهای فرعی شامل خیساندن بذر در محلول زئارالنون (صفر، ۶۰ و ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر) و تزریق نانوزئولیت (صفر، ۱/۵ و ۳ گرم بر کیلوگرم) در بستر کشت بودند. آزمایش در سه تکرار اصلی طراحی و در هر واحد، ده عدد بوته مستقر شد. مؤلفه‌های سبز شدن، صفات رویشی و برخی صفات فیزیولوژیکی در این تحقیق شامل چندین پارامتر کلیدی اندازه‌گیری شدند. درصد سبز شدن در روز سوم و ششم پس از کشت با استفاده از فرمول‌های مشخص محاسبه شد. میانگین زمان تا حداکثر سبز شدن (MTG) به‌عنوان

شاخصی برای سرعت جوانه‌زنی تعیین گردید (Ellis and Roberts, 1981). همچنین شاخص بنیه گیاهچه با ضرب طول گیاهچه در درصد سبز شدن نهایی محاسبه شد. سطح برگ اولیه و نهایی به‌ترتیب در روزهای ۲۵ و ۵۰ پس از کشت بذور توسط مساحت‌سنج برگ اندازه‌گیری شد. طول و قطر ساقه با استفاده از کولیس و خط‌کش اندازه‌گیری گردید. درصد ماده خشک بوته از تفاضل وزن تازه و خشک بوته محاسبه شد. شاخص کلروفیل با دستگاه کلروفیل‌متر مینولتا ۵۰۲ ژاپن اندازه‌گیری و طول و وزن تازه ریشه نیز ثبت گردید. برای اندازه‌گیری میزان پرولین در برگ، ابتدا ۰/۱ گرم از بافت گیاهی در ۱۰ میلی‌لیتر محلول ۳ درصد سولفوسالیسلیک ساییده می‌شود و سپس عصاره حاصل به مدت پنج دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور سانتریفوژ می‌شود. ۲ میلی‌لیتر از مایع رویی به لوله آزمایش منتقل و به آن ۲ میلی‌لیتر معرف نین‌هیدرین و ۲ میلی‌لیتر اسیداستیک اضافه شد. لوله‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب گرم قرار گرفتند و سپس به ظرف آب سرد منتقل شدند تا واکنش متوقف شود. پس از اضافه کردن ۴ میلی‌لیتر تولوئن و هم زدن، لایه فوقانی که حاوی پرولین بود، برای اندازه‌گیری جذب در طول موج ۵۲۰ نانومتر استفاده گردید. مقدار پرولین با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه شد. در نهایت، عملکرد رویشی گیاه با اندازه‌گیری وزن تر بوته در انتهای دوره آزمایش ارزیابی شد (Chen and Zhang, 2016).

نتایج و بحث

میانگین زمان حداکثر جوانه‌زنی (سبز شدن)

طبق نتایج جدول آنالیز واریانس ۱، تنها اثر مستقل تیمارهای شیمیایی بر شاخص میانگین زمان حداکثر جوانه‌زنی معنی‌دار شده است ($p\leq\%1$). طبق جدول مقایسه میانگین شماره ۱، تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر (ppb)، کوتاه‌ترین «زمان حداکثر سبز شدن» را نشان داد، در حالی که گیاهان شاهد و بدون هیچ‌گونه تیمار با مواد بیشترین زمان را داشتند. میانگین زمان حداکثر جوانه‌زنی بذور (MTG[1]) به مدت‌زمانی اشاره دارد که بذر برای رسیدن به حداکثر درصد جوانه‌زنی نیاز دارد. این مؤلفه به‌عنوان شاخص کلیدی در ارزیابی کیفیت بذر و توانایی آن برای رشد و توسعه در شرایط محیطی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. MTG معمولاً به‌عنوان زمان لازم برای جوانه‌زنی ۵۰٪ یا ۱۰۰٪ از بذرها تعریف می‌شود و می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دما، رطوبت، اکسیژن و شرایط خاک قرار گیرد. در شرایط آزمایش، این شاخص برای ۱۰۰٪ جوانه‌زنی روکولا در نظر گرفته شد. ترکیبات شبه‌اکسینی و شبه‌جیبرلینی، مانند زرالنون، می‌توانند به بهبود رشد گیاهچه‌ها نیز کمک کنند. این تأثیر به نوبه خود می‌تواند به افزایش سرعت سبز شدن و بهبود استقرار گیاهچه‌ها در خاک منجر شود (Zeinalipour *et al*., 2025). بر پایه معدود مطالعات صورت‌گرفته تاکنون، اثرات زرالنون (ZEN) ممکن است بسته به شرایط محیطی، مانند رطوبت و دما، متفاوت باشد. در شرایط بهینه، استفاده از آن می‌تواند فرایندهای فیزیولوژیکی را که از جوانه‌زنی و مراحل اولیه رشد حمایت می‌کنند، تقویت کند (Dziurka *et al*., 2021).

[1] Maximum Germination Time

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر صفات اندازه‌گیری‌شده در روکولا

Table 1. ANOVA results for the effects of treatments on measured traits in arugula

S.O.V	df	MS					
		Maximum Germination Time	Emergence Percentage at day 3	Emergence Percentage at day 6	Seedling Vigor Index	Primary Leaf Area	Final Leaf Area
Irrigation Error	1	0.533 ^{ns}	10.800 ^{ns}	40.833 ^{ns}	0.833 *	13.333 ^{ns}	83.333 ^{ns}
Chemical Treatment	4	0.033	0.100	5.833	0.033	163.333	23.333
Irrigation × Treatment	4	21.250 **	34.467 **	75.000 *	6.700 **	580.000 *	447.083 **
Treatment Error	4	0.117 ^{ns}	0.967 ^{ns}	78.333 ^{ns}	1.000 ^{ns}	113.333 ^{ns}	243.750 **
Total	16	0.608	0.692	57.917	0.450	96.667	24.167
	29						
C.V		6.71	12	7.94	8.46	11.43	6.30

****معنی‌دار در سطح ۱٪، *معنی‌دار در سطح ۵٪ و ns عدم اختلاف معنی‌دار**

**** = Significant at p < 0.01; * = Significant at p < 0.05; ns = Non-significan**

درصد سبز شدن روز سوم

تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر بیشترین درصد سبز شدن را در روز سوم نشان داد. اثر تیمارها در این مرحله معنی‌دار بود (p≤%1)، در حالی که سطوح آبیاری هنوز نتوانستند تفاوت معنی‌دار در نتایج ایجاد کنند. نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد که زئارالنون ممکن است دارای خصوصیات شبه‌اکسینی و جیبرلینی باشد که از این طریق به افزایش جوانه‌زنی بذرها کمک می‌کند. این ترکیب می‌تواند با تحریک تقسیم سلولی و افزایش فعالیت‌های متابولیکی، به جوانه‌زنی بذرها کمک کند. در مواردی نیز مشاهده شده است که کاربرد غلظت‌های بالای این ترکیب از جوانه‌زنی بذور ذرت، بین ۱۴ تا ۵۴ درصد ممانعت به عمل آورده است (Apolonia *et al*., 2021).

درصد سبز شدن روز ششم

در روز ششم پس از کشت بذور نیز همچنان تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر بیشترین درصد سبز شدن را داشت و این اثر در سطح ۵٪ معنی‌دار بود (p≤0.05). دلیل اندازه‌گیری این پارامتر در روز ششم پس از کشت بذرهای روکولا، بررسی تداوم اثرات دو ترکیب زئارالنون و نانوزئولیت و توان رقابتی آن‌ها در طی زمان بر پارامتر درصد جوانه‌زنی بود.

شاخص بنیه گیاهچه

تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر، بالاترین شاخص بنیه گیاهچه را داشت؛ هرچند با تیمارهای نانوزئولیت ۱/۵ و ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و نیز با تیمار زئارالنون ۶۰ میکرولیتر بر لیتر نیز فاقد اختلاف معنی‌دار بود (p≤%1). اثر مستقل تیمارهای آبیاری نیز بر این مؤلفه معنی‌دار شد (p≤%5). بیشترین شاخص بنیه در گیاهچه‌های روکولا تحت شرایط آبیاری نرمال با ظرفیت زراعی ۱۰۰ درصد به دست آمد. زئارالنون به‌عنوان ترکیبی فیتوهورمونی عمل می‌کند که می‌تواند به بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاه کمک کند. این ترکیب با افزایش فعالیت‌های آنزیمی و بهبود متابولیسم گیاهی می‌تواند به افزایش سرعت رشد و توسعه ریشه و گیاهچه کمک کند. در تحقیقات مشابه، زئارالنون نشان داده است که می‌تواند به افزایش فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش استرس اکسیداتیو در گیاهان تحت تنش آبی کمک کند (Filek *et al*., 2020).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثرات مستقل تیمار نانوزئولیت و زیرالنون بر صفات روکولا

Table 2. Comparison of the average independent effects of nanozeolite and zearalenone treatments on arugula traits

Treatments	Maximum Germination Time	Emergence Percentage at day 15	Seedling Vigor Index	Primary Leaf Area	Leaf proline content (µmol g-1 FW)
Control	6.67 ± 0.21 a	45.83 ± 3.28 c	2.33 ± 0.21 b	25.53 ± 1.12 c	0.35 ± 0.03 d
ZEN 60	6.33 ± 0.62 a	48.33 ± 1.67 c	2.67 ± 0.33 b	29.88 ± 1.91 b	0.44 ± 0.02 cd
·ZEN 120	2.40 ± 0.13 c	89.17 ± 3.28 a	4.67 ± 0.33 a	34.70 ± 0.73 a	0.48 ± 0.06 bc
NZ 1.5	4.75 ± 0.36 b	81.67 ± 5.45 b	4.17 ± 0.17 a	32.52 ± 0.86 ab	0.54 ± 0.05 ab
NZ 3	2.83 ± 0.17 c	82.33 ± 3.09 b	4.33 ± 0.33 a	33.10 ± 0.57 ab	0.60 ± 0.08 a

میانگین‌های دارای حروف مشترک دارای تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون مقایسه LSD در سطح ۱٪ نیستند.

.Means with common letters are not significantly different based on the LSD comparison test at the 1% level

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات مستقل تیمار نانوزئولیت و زیرالنون بر صفات روکولا

Table 3. Comparison of the average independent effects of nanozeolite and zearalenone treatments on arugula traits

Treatments	Seedling Vigor Index	Leaf proline content (µmol g^{-1} FW)
FC 70%	3.47 ± 0.36 b	0.39 ± 0.02 b
FC 100%	3.80 ± 0.22 a	0.57 ± 0.04 a

میانگین‌های دارای حروف مشترک دارای تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون مقایسه LSD در سطح ۱٪ نیستند.

.Means with common letters are not significantly different based on the LSD comparison test at the 1% level.

سطح برگ اولیه

تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر، بیشترین سطح برگ را در شرایط این مطالعه تولید نمود و این اثر در سطح ۱٪ معنی‌دار بود (p≤%5). در گیاه تاج‌خروس (*Amaranthus cruentus*) پارامترهای تعداد، سطح و وزن خشک برگ به‌طور معنی‌داری با افزایش تنش خشکی کاهش یافتند (Olufolaji

et al., 2010). مطابق نتایج پژوهش دیگر نیز که توسط باقری و همکاران (Bagheri *et al*., 2011) انجام شد، گزارش دادند که با افزایش تنش خشکی، میزان سطح برگ نهال‌های پسته به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کاهش سطح برگ گیاه تحت تنش خشکی درمورد پیاز و ریحان نیز گزارش شده است (Moshtaghi Niaki, 2008).

سطح برگ نهایی

تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر و آبیاری نرمال، بیشترین سطح برگ را داشت و این اثر در سطح ۵٪ معنی‌دار بود ($P\leq0.05$). در شرایط این آزمایش، کاهش سطح برگ به‌خصوص در گیاهان تحت تنش کم‌آبی، اما بدون تیمار با مواد رخ داد. کاهش، جذب مواد و عناصر غذایی در شرایط کمبود آب، رشد و توسعه برگ‌ها را محدود می‌کند. کاهش سطح برگ نیز به کاهش از دست رفتن آب از طریق تعرق و کاهش فتوسنتز منجر می‌شود که به‌عنوان اولین مکانیسم دفاعی گیاه در برابر خشکی در نظر گرفته می‌شود. در گل زینتی جعفری (*Tagetes erecta* L.) تحت تنش خشکی، سطح برگ و وزن خشک اندام‌های هوایی کاسته شد (Riaz *et al*., 2013). در شرایط تنش، گیاه سطح برگ خود را کاهش داد و همین امر به کاهش تولید مواد فتوسنتزی و در نهایت، به کاهش وزن خشک گیاه منجر شد (Chutia and Borah, 2012). از طرفی دیگر، در طی این تحقیق، کاربرد زئارالنون و نانورئولیت باعث بهبود رشد گیاه و حفظ تعداد برگ بیشتری در شرایط تنش کم‌آبی شده است و از این طریق، وزن خشک گیاه نیز تحت شرایط تنش کم‌آبی اعمال شده و تا حدودی حفظ گردیده است.

طول ساقه

تیمار زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر، بیشترین طول ساقه را در شرایط آبیاری نرمال نشان داد و این اثر در سطح ۵٪ معنی‌دار بود ($p\leq5\%$). همچنین درمورد پارامتر طول ساقه تحت شرایط کم‌آبیاری در ظرفیت زراعی ۷۰٪ ممکن است زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر از طریق تنظیم طول ساقه کوتاه‌تر، شرایط بقای گیاهان تحت تنش کم‌آبی را باعث شده باشد. دلیل این استنباط و نتیجه‌گیری، حفظ بهتر سطح برگ در شرایط تنش کم‌آبی تحت تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر و همچنین در تیمار توأم تنش کم‌آبی و نانوزئولیت ۳ پی‌پی‌ام (سطح برگ در این تیمار نیز به خوبی گیاهان تیمارشده با زئارالنون در غلظت بالاتر محفوظ مانده) است. ترکیبات زیستی، به‌ویژه تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها، نقش مهمی در افزایش ارتفاع ساقه در گیاهان دارند. این ترکیبات بر فرایندهای فیزیولوژیکی مختلفی تأثیر می‌گذارند که به رشد و توسعه گیاه کمک می‌کنند. به نظر می‌رسد زئارالنون نیز با توجه به خصوصیات شبه‌هورمونی که در ماهیت و عملکرد خود دارد، توانسته است با افزایش طول سلول‌ها، بر افزایش طول ساقه مؤثر باشد (Dziurka *et al*., 2021).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر صفات اندازه‌گیری‌شده در روکولا

Table 4. Results of analysis of variance of the effect of treatments on measured traits in arugula

S.O.V.	df	MS					
		Stem length	Plant dry weight	Root fresh weight	Root dry weight	Vegetative yield	Proline
Irrigation levels	1	8.321 **	0.480 ^{ns}	4.332 *	0.069 ^{ns}	3787.53 *	83.333 **
Irrigation error	4	0.004	5.308	0.084	0.007	171.63	23.333
Treatments	4	5.403 **	24.317 *	0.263 *	0.06 **	12804.61 **	447.083 **
Irrigation levels ×Treatments	4	2.575 **	15.604 *	0.239 *	0.012 *	3721.450 **	243.750 ^{ns}
Treatment error	16	0.306	3.968	0.034	0.003	145.00	24.167
Total	29						
C.V (%)		4.97	2.29	10.18	11.84	3.34	6.30

****معنی‌دار در سطح ۱٪، *معنی‌دار در سطح ۵٪ و ns عدم اختلاف معنی‌دار**

**** = Significant at p < 0.01; * = Significant at p < 0.05; ns = Non-significan**

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل تیمارهای آبیاری و مواد بر خصوصیات فیزیولوژیکی روکولا

Table 5. Comparison of the average effects of irrigation treatments and materials on the physiological characteristics of arugula

Treatments		Stem Length (cm)	Emergence Percentage at day 3	Plant dry Weight (mg)	Root fresh weight (g)	Vegetative yield (g m^2)	Final leaf area (cm^2)
FC 100%	Control	10.50 ± 0.21 de	51.67 ± 4.49 c	240.00 ± 0.00 d	1.50 ± 0.00 cde	377.33 ± 4.42 e	60.00 ± 0.00 d
	ZEN 60	11.50 ± 0.42 bc	50.00 ± 0.00 c	430.00 ± 3.46 b	1.10 ± 0.05 e	398.67 ± 0.55 c	81.67 ± 1.39 b
	ZEN 120	13.03 ± 0.38 a	91.67 ± 6.12 a	475.67 ± 3.83 a	1.17 ± 0.03 de	391.33 ± 6.23 d	86.67 ± 3.40 a
	NZ 1.5	11.87 ± 0.48 b	70.33 ± 3.40 b	370.65 ± 1.76 c	1.50 ± 0.00 cde	359.67 ± 9.85 f	80.00 ± 2.94 b
	NZ 3	11.43 ± 0.18 bcd	78.00 ± 5.88 b	461.00 ± 1.18 a	1.87 ± 0.03 abc	453.00 ± 19.18 a	80.00 ± 2.94 b
FC 70%	Control	8.50 ± 0.00 f	40.00 ± 0.00 e	210.67 ± 0.68 e	1.73 ± 0.03 bcd	251.33 ± 3.74 j	73.33 ± 3.40 c
	ZEN 60	11.73 ± 0.54bc	46.67 ± 3.40 d	250.67 ± 2.38 d	2.33 ± 0.12 ab	288.00 ± 1.02 i	60.00 ± 0.00 d
	ZEN 120	10.20 ± 0.00 e	86.67 ± 3.40 a	388.67 ± 1.36 c	2.23 ± 0.07 ab	313.67 ± 3.34 h	80.00 ± 0.00 b
	NZ 1.5	11.77 ± 0.32 bc	70.00 ± 0.00 b	350.67 ± 2.72 c	2.20 ± 0.31 ab	348.67 ± 3.74 g	80.67 ± 3.40 b
	NZ 3	10.87 ± 0.09 cde	86.67 ± 3.40 a	380.67 ± 1.89 c	2.43 ± 0.09 a	423.00 ± 8.67 b	81.67 ± 4.49 b

میانگین‌های دارای حروف مشترک دارای تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون مقایسه LSD در سطح ۱٪ نیستند.

Means with common letters are not significantly different based on the LSD comparison test at the 1% level.

وزن خشک بوته

تأثیر متقابل سطوح آبیاری بر میزان ماده خشک بوته آروگولا در سطح ۵٪ معنی‌دار بود ($p\leq5\%$) و اثر مستقل کاربرد مواد نیز در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. بیشترین مقادیر ماده خشک در سطح آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و تحت تأثیر تیمار با زئارالنون ۱۲۰ میکرولیتر بر لیتر و نانوذره زئولیت ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدون اختلاف معنی‌دار حاصل شد. کمترین مقادیر ماده خشک در گیاهان تحت کم‌آبیاری ۷۰٪ ظرفیت زراعی و بدون هیچ‌گونه تیمار ثبت گردید. در مطالعاتی دیگر نیز در گیاه تاج‌خروس، پارامترهای تعداد، سطح و وزن خشک برگ به‌طور معنی‌داری با افزایش تنش خشکی کاهش یافتند (Javaid et al., 2024). ترکیباتی مانند زئارالنون می‌توانند با افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه و آنتی‌اکسیدان‌ها، به کاهش آسیب‌های ناشی از استرس اکسیداتیو کمک کنند و در نتیجه، درصد ماده خشک را حفظ کنند (Kościelniak *et al.*, 2011). همچنین زئولیت‌ها نیز به دلیل دارا بودن پتاسیم مناسب در ساختار خود، به دلیل توانایی بالا در جذب آب و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد می‌توانند باعث بهبود رشد گیاه شوند. کاربرد کودهای زیستی برای افزایش تولید و حفظ حاصلخیزی پایدار خاک، دارای اهمیت ویژه‌ای در نظام‌های کشاورزی پایدار هستند (Mumpton, 1999). نتایج برخی محققان نیز حاکی از این است که گیاهان تحت تیمار با زئارالنون نسبت به گیاهان کنترل، افزایش در کیفیت و کمیت محصول را نشان دادند که این برتری شامل افزایش محتوای پروتئین و آنتی‌اکسیدان‌ها در بذرها و برگ‌ها نیز بود (Dziurka *et al.*, 2025).

طول ریشه

بیشترین طول ریشه در گیاهان تیمارشده با نانوذرات زئولیت ۳ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط تنش کم‌آبی (۷۰٪ ظرفیت زراعی) مشاهده شد. کمترین طول ریشه در گیاهان شاهد و بدون دریافت مواد در ظرفیت زراعی ۱۰۰٪ به دست آمد. اثرات متقابل تیمارها و سطوح آبیاری بر این صفت معنی‌دار بود. نانوزئولیت‌ها به دلیل ساختار میکروپور و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا می‌توانند آب را در خاک نگه دارند و در نتیجه، رطوبت را برای ریشه‌ها فراهم کنند. این ویژگی به گیاهان گشنیز تحت تیمار کمک می‌کند تا در شرایط کم‌آبی، آب بیشتری را جذب کنند و در نتیجه، رشد ریشه‌ها افزایش یابد (Mahmoud *et al.*, 2023). همچنین نانوزئولیت‌ها می‌توانند با بهبود شرایط خاک و افزایش دسترسی به مواد مغذی، رشد ریشه‌ها را تحریک کنند. در مطالعات انجام‌شده در گل محمدی، مشاهده شده است که استفاده از نانوزئولیت باعث افزایش طول و حجم ریشه در گیاهان مختلف می‌شود (Mahmoudi, 2022).

وزن تر ریشه

هم اثرات مستقل و هم اثرات متقابل سطوح آبیاری و تیمارهای زئارالنون/ نانوزئولیت بر وزن تر ریشه آروگولا در سطح ۵٪ معنی‌دار شد ($p\leq5\%$). بیشترین وزن تر ریشه در شرایط تنش کم‌آبی و تحت تأثیر تیمار با نانوزئولیت ۳

میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. کمترین وزن تر ریشه در گیاهان تحت آبیاری معمول و هر دو غلظت زئارالنون ثبت شد. استفاده از نانوزئولیت‌ها می‌تواند بر متابولیسم گیاهی تأثیر بگذارد و باعث افزایش فعالیت‌های آنزیمی و تولید متابولیت‌های ثانویه شود. این تغییرات می‌توانند به بهبود رشد و توسعه ریشه‌ها کمک کنند و در نهایت، وزن تر ریشه را افزایش دهند (Swanson *et al.*, 2022). برخی محققان نیز گزارش نموده‌اند که نانوزئولیت‌ها به‌عنوان جاذب‌های آب و مواد مغذی عمل می‌کنند و می‌توانند ظرفیت نگهداری آب خاک را افزایش دهند. این ویژگی به گیاهان روکولا کمک می‌کند تا در شرایط تنش آبی، رطوبت و مواد مغذی بیشتری را جذب کنند که در نهایت منجر به افزایش وزن تر ریشه این گیاه شد.

عملکرد پیکره رویشی

نتایج نشان داد که تأثیرات مستقل سطوح آبیاری و تیمار با مواد و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها بر عملکرد پیکره رویشی آروگولا در سطح ۱٪ معنی‌دار بود ($p\leq\%1$). بیشترین عملکرد در سطح آبیاری ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و تحت تأثیر کاربرد نانوزئولیت ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بستر کشت (۴۵۳ گرم بر مترمربع) به دست آمد. در شرایط تنش کم‌آبی، عملکرد گیاه تحت تأثیر تیمار با نانوزئولیت ۳ بهتر حفظ شد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از زئولیت در شرایط تنش خشکی می‌تواند به بهبود شرایط رویشی و فیزیولوژیک گیاهان کمک کند. در مطالعه دیگر، مصرف زئولیت منجر به افزایش جذب آب و بهبود عملکرد گیاهان خارمریم و رازیانه در شرایط تنش آبی شد. این نتایج نشان‌دهنده این است که زئولیت‌ها می‌توانند به‌عنوان عاملی مؤثر در بهبود عملکرد گیاهان در شرایط کم‌آبی عمل کنند. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که نانوذرات اکسید روی می‌توانند به افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی کمک کنند. در این پژوهش، محلول‌پاشی با نانواکسید روی موجب افزایش سازوکارهای دفاعی گیاه و بهبود عملکرد در شرایط تنش آبی شد (Amooaghaie, 2024). این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات می‌توانند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی تنش کم‌آبی بر عملکرد گیاهان عمل کنند (Antonoglou *et al.*, 2025).

پرولین برگ

طبق نتایج آنالیز واریانس، اثر متقابل تیمارهای آبیاری و کاربرد نانوزئولیت/ زئارالنون بر میزان پرولین برگ معنی‌دار نشد؛ اما اثرات مستقل تیمار با مواد و اثر مستقل سطوح آبیاری معنی‌دار بود ($p\leq\%1$). بیشترین میزان پرولین در برگ‌های گیاهان تحت تیمار با نانوزئولیت ۳ و ۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. همچنین گیاهان در شرایط تنش کم‌آبی (۷۰٪ ظرفیت زراعی)، میزان پرولین بیشتری نسبت به گیاهان شاهد نشان دادند. نتایج سایر تحقیقات بر توت‌فرنگی و برگ گیاهچه‌های گیاهان چوبی نشان می‌دهند که با افزایش شدت و مدت‌زمان تنش کم‌آبی، میزان پرولین در برگ‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ برای مثال، در شرایط تنش شدید، میزان پرولین می‌تواند تا ۲/۳ برابر بیشتر از گیاهان کنترل باشد. این افزایش در پرولین به گیاهان کمک می‌کند تا در برابر آسیب‌های ناشی از تنش خشکی مقاومت بیشتری داشته باشند و همچنین به بهبود عملکرد آن‌ها در شرایط نامساعد کمک می‌کند (Reza *et al.*, 2023). زمانی که گیاهان تحت تنش کم‌آبی قرار می‌گیرند، تجمع پرولین در برگ‌ها افزایش می‌یابد که این امر به تنظیم فشار اسمزی و حفظ تعادل آب در سلول‌ها کمک می‌کند. همچنین پرولین می‌تواند منبع نیتروژن و کربن برای گیاهان باشد و به آن‌ها در بازگشت به حالت طبیعی پس از رفع تنش کمک کند. این تجمع پرولین به گیاهان اجازه می‌دهد تا در شرایط نامساعد، بهتر عمل کنند و از آسیب‌های ناشی از استرس جلوگیری کنند (Renzetti *et al.*, 2023). رایج‌ترین مکانیسم سازش گیاهان با تنش خشکی، تجمع قندهای محلول و اسیدهای آمینه آزاد در درون سلول است. پرولین به‌عنوان ماده محلول سبب تنظیم فشار اسمزی و کاهش از دست دادن آب از سلول و نگهداری آماس می‌شود. یکی از خواص فیزیکی پرولین، حلالیت بالای آن است. مولکول‌های پرولین شامل قسمت های آب‌دوست و آب‌گریز است. پرولین محلول می‌تواند حلالیت پروتئین‌های مختلف را تحت تأثیر قرار دهد و جلوی غیرطبیعی شدن آلبومین را بگیرد. این خصوصیت پرولین به این دلیل است که رابطه متقابل بین پرولین و سطح پروتئین‌های آب‌گریز برقرار می‌شود و به علت افزایش سطح کل مولکول‌های پروتئین آب‌دوست، پایداری آن‌ها افزایش می‌یابد و از تغییر ماهیتشان جلوگیری می‌شود. آنزیم‌ها نیز به دلیل ساختمان پروتئینی خود، تحت تأثیر این سازوکار پرولین قرار می‌گیرند و محافظت می‌شوند (Hayat *et al.*, 2012). در شرایط تنش‌های کم‌آبی و تنش خشکی، به‌طور معمول میزان پرولین درونی برگ گیاهان افزایش پیدا می‌کند و احتمالاً یکی از دلایل کاهش میزان کلروفیل، افزایش سنتز پرولین باشد (Sun *et al.*, 2025).

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه تأثیر قابل توجه زئارالنون و نانوزئولیت را بر بهبود پارامترهای جوانه‌زنی و رشد گیاهچه روکولا در شرایط تنش کم‌آبی تأکید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که زئارلنون، به‌ویژه در غلظت ۱۲۰ میکرولیتر در لیتر، به‌طور قابل توجهی میانگین زمان حداکثر جوانه‌زنی را کاهش داده و بنیه گیاهچه‌ها را بهبود بخشیده است که پتانسیل آن را به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد گیاه نشان می‌دهد؛ علاوه بر این، همین تیمار نه‌تنها درصد جوانه‌زنی را در روزهای سوم و ششم پس از کاشت افزایش داد، بلکه به افزایش سطح برگ و طول ساقه نیز کمک کرد که برای داشتن گیاهچه‌های باکیفیت در روکولا دارای اهمیت است. تعامل بین سطوح آبیاری و تیمارهای زئارالنون و نانوزئولی نشان داد که مدیریت بهینه آب، همراه با استفاده از این ترکیبات می‌تواند به‌طور قابل توجهی اثرات منفی کمبود آب را کاهش دهد. این موضوع به‌ویژه در زمینه تغییرات اقلیمی که شرایط خشکی در حال افزایش است، حائز اهمیت است. این مطالعه نقش تجمع پرولین را به‌عنوان مکانیزمی حفاظتی در برابر استرس اکسیداتیو برجسته و پیشنهاد می‌کند که این تیمارها می‌توانند تاب‌آوری گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش دهند. ادغام زئارلنون و نانوزئولیت در شیوه‌های کشاورزی، استراتژی‌ای امیدوارکننده برای بهبود کشت روکولا و احتمالاً سایر سبزی‌های برگی، به‌ویژه در محیط‌های محدود به آب، ارائه می‌دهد. این تحقیق نه‌تنها به درک ما از واکنش‌های گیاه به تنش خشکی کمک می‌کند، بلکه راه را برای شیوه‌های کشاورزی پایدار هموار می‌سازد که می‌تواند امنیت غذایی را در برابر چالش‌های اقلیمی افزایش دهد. مطالعات آینده باید بر آزمایش‌های میدانی تمرکز کنند تا این یافته‌ها را تأیید و مزایای بلندمدت این تیمارها را بر عملکرد محصول، به‌ویژه در شرایط و اقلیم‌های کم‌آب، بررسی کنند.

References

Amooaghaie, R., 2024. Dose-dependent effect of CuO nanoparticles on water deficit-induced osmotic and oxidative stresses in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.). Journal of Plant Process and Function. 15(57), 1–12.

Antonoglou, S., Koutroubas, S.D., Antoniadis, V., Damalas, C.A., Fotiadis, S., and Markopoulos, T., 2025. Zeolite enhances the beneficial effects of sewage sludge on barley yield, increases nitrogen use, and improves soil properties. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 25(2), 5032–5045. https://doi.org/10.1007/s42729-025-02445-5

Bagheri, V., Shamshiri, M.H., Shirani, H., and Roosta, H.R., 2011. Effect of arbuscular mycorrhizae and drought stress on growth indices, water relations and proline as well as soluble carbohydrate content in pistachio (*Pistacia vera* L.) rootstock seedlings. Iranian Journal of Horticultural Science. 42(4), 365–377. [In Persian with English Abstract]

Chen, T., and Zhang, B., 2016. Measurements of proline and malondialdehyde content and antioxidant enzyme activities in leaves of drought-stressed cotton. Bio-Protocol. 6(17), e1913. https://doi.org/10.21769/bioprotoc.1913

Chutia, J., and Borah, S.P., 2012. Water stress effects on leaf growth and chlorophyll content but not the grain yield in traditional rice (*Oryza sativa* L.) genotypes of Assam, India II. Protein and proline status in seedlings under PEG-induced water stress. American Journal of Plant Sciences. 3(7), 971–980. https://doi.org/10.4236/ajps.2012.37115

Dziurka, M., Maksymowicz, A., Ostrowska, A., and Biesaga-Kościelniak, J., 2021. The interaction effect of drought and exogenous application of zearalenone on the physiological, biochemical parameters and yield of legumes. Journal of Plant Growth Regulation. 40(5), 1824–1835. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10229-7

El-Saadony, M.T., Saad, A.M., Soliman, S.M., Salem, H.M., Desoky, E.S.M., Babalghith, A.O., El-Tahan, A.M., Ibrahim, O.M., Ebrahim, A.A.M., Abd El-Mageed, T.A., Elrys, A.S., El-Tarabily, K.A., and AbuQamar, S.F., 2022. Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. Frontiers in Plant Science. 13, 946717. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.946717

Filek, M., Łabanowska, M., Kurdziel, M., and Sieprawska, A., 2020. The interaction effect of drought and exogenous application of zearalenone on the physiological, biochemical parameters and yield of legumes. Journal of Plant Growth Regulation. 40, 1345–1357. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10229-7

Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M.N., Wani, A.S., Pichtel, J., and Ahmad, A., 2012. Role of proline under changing environments: A review. Plant Signaling and Behavior. 7(11), 1456–1466. https://doi.org/10.4161/psb.21949

Javaid, A., Munir, N., Abideen, Z., Siddiqui, Z.S., and Yong, J.W.H., 2024. The role of natural and synthetic zeolites as soil amendments for mitigating the negative impacts of abiotic stresses to improve agricultural resilience. Plant Stress. 14, 100627. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100627

Jilani, M.I., Ali, A., Rehman, R., Sadique, S., and Nisar, S., 2015. Health benefits of Arugula: A review. International Journal of Chemical and Biochemical Sciences. 8, 65–70.

Kościelniak, J., Biesaga-Kościelniak, J., Janeczko, A., Filek, W., and Kalaji, H.M., 2011. The effect of zearalenone on PSII photochemical activity and growth in wheat and soybean under salt (NaCl) stress. Acta Physiologiae Plantarum. 33(6), 2329–2338. https://doi.org/10.1007/s11738-011-0773-1

Li, H., Wang, L., Zhang, Y., Liu, X., and Chen, J., 2025. Harnessing nanoparticles to enhance crop production under drought stress: A quantitative meta-analysis. Agricultural Water Management. 315, 109550. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109550

Mahmoud, A.W.M., Rashad, H.M., Esmail, S.E.A., Alsamadany, H., and Abdeldaym, E.A., 2023. Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles, A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. Plants. 12(15), 2838. https://doi.org/10.3390/plants12152838

Mahmoudi, M., 2022. The effect of nanozeolite on morphological and physiological properties of Rosa damascena. Journal of Medicinal Plants Biotechnology. 7(2), 19–35.

Moshtaghi Niaki, M., 2008. The effect of water deficit stress on some morphological and physiological characteristics of three onion (*Allium cepa* L.) cultivars. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. [In Persian].

Mumpton, F.A., 1999. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Proceedings of the National Academy of Sciences. 96(7), 3463–3470. https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3463

Oguz, M.C., Aycan, M., Oguz, E., and Poyraz, I., 2022. Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. Phytón-International Journal of Experimental Botany. 91(1), 180–197.

Olufolaji, A.O., Odeleye, F.O., and Ojo, O.D., 2010. Effect of soil moisture stress on the emergence, establishment and productivity of Amaranthus (*Amaranthus cruentus* L.). Agriculture and Biology Journal of North America. 1(6), 1169–1181.

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., and Xu, J., 2023. Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. Plant Biology. 25(3), 379–395. https://doi.org/10.1111/plb.13510

Reed, R.C., Bradford, K.J., and Khanday, I., 2022. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. Heredity. 128(6), 450–459. https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2

Renzetti, M., Funck, D., and Trovato, M., 2025. Proline and ROS: A unified mechanism in plant development and stress response? Plants. 14(1), 2. https://doi.org/10.3390/plants14010002

Riaz, A., Younis, A., Taj, A.R., and Karim, A., 2013. Effect of drought stress on growth and flowering of marigold (*Tagetes erecta* L.). Pakistan Journal of Botany. 45(Special Issue), 123–131.

Shoaib, S., Ali, Q., Ali, S., Ashraf, M.Y., and Anwar, S., 2025. Mitigating effect of γ-aminobutyric acid and gibberellic acid on tomato plant cultivated in Pb-polluted soil. Scientific Reports. 15, 96450. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96450-4

Sun, C.H., Li, X.F., Hu, Y.L., and Zhao, X.Y., 2015. Proline, sugars, and antioxidant enzymes respond to drought stress in the leaves of strawberry plants. Korean Journal of Horticultural Science and Technology. 33(5), 625–632. https://doi.org/10.7235/hort.2015.15054

Swanson, E.O., Johnson, C.M., and Smith, R.L., 2022. Nutrient and nitrate composition of greenhouse-grown leafy greens: A trial comparison between conventional and organic fertility treatments. Frontiers in Sustainable Food Systems. 6, 811995. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.811995

Zeinalipour, N., Galehdari, F., Saadati, S., Arvin, M.J., and Sarcheshmehpour, M., 2025. Zearalenone and nanozeolite improve Arugula (*Eruca sativa*) drought tolerance by enhancing photosynthesis and water relations. Scientific Reports. 15, 14765. https://doi.org/10.1038/s41598-025-14765-8