



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Multicriteria Analysis of the Effect of Organic Growth Stimulants on Canola

Reza Mohammadikia^a , and Mohammad Pasandideh^a

^a Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

May 18, 2026

Revised

July 21, 2026

Accepted

August 1, 2026

Published online

September 06, 2026

Keywords

Amino acid
Decision matrix
Humic acid
Seaweed extract
VIKOR method

*Corresponding author's email

rmswri@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Canola (*Brassica napus* L.) is one of the most important oilseed crops, and its production in arid and semi-arid regions is increasingly constrained by water scarcity and drought stress. Improving water productivity and yield stability under limited irrigation conditions is therefore essential for sustainable canola production. Biostimulants as organic growth stimulants have recently gained attention as an eco-friendly strategy to mitigate drought-induced yield losses. In addition, increasing evidence suggests that the effectiveness of biostimulants is closely related to environmental conditions and plant physiological status, particularly under water-limited scenarios. Under drought stress, these compounds can enhance root development, improve nutrient uptake efficiency, and regulate osmotic balance, leading to better maintenance of photosynthetic activity and yield formation. However, their responses are often variable depending on the type of biostimulant, intensity of water stress, and crop genotype, which makes it necessary to evaluate their performance under field conditions using integrated approaches.

Materials and Methods: This study aimed to evaluate the effects of organic growth stimulants on seed yield, seed oil content, and water productivity of canola under normal irrigation and water stress conditions, and to rank treatments using the VIKOR multi-criteria decision-making method. A split-plot experiment based on a randomized complete block design with three replications was conducted over two growing seasons at the Moghan Agricultural Research Station. Irrigation treatments (main plots) included normal irrigation and water stress, while sub-plots consisted of foliar application of amino acids, humic acid, fulvic acid, seaweed extract, and an untreated control. In addition, a Monte Carlo simulation approach with 2000 iterations was applied to assess the stability of the VIKOR ranking under uncertainty in criterion weights.

Results: Mean comparison results showed that water stress reduced seed yield by 5.4%, seed oil content by 9.2%, and water productivity by 4.5% compared with normal irrigation. In contrast, application of growth stimulants increased seed yield by 10.47–15.03%, seed oil content by 5.76–11.26%, and water productivity by 9.84–17.21% compared with the control. Among treatments, amino acid under water stress produced the highest seed yield (3703 kg ha⁻¹) and water productivity (1.79 kg m⁻³), whereas humic acid under normal irrigation resulted in the highest seed yield (3844 kg ha⁻¹) and seed oil content (43.9%). VIKOR analysis indicated that amino acid under water stress had the lowest Q value (Q = 0.022), ranking first as the most desirable compromise solution. Monte Carlo sensitivity analysis further confirmed the robustness of this treatment, which retained the first rank in 82.65% of simulation scenarios.

Conclusion: Overall, the results demonstrate that drought stress significantly reduces canola yield and quality parameters, while organic growth stimulants effectively mitigate these negative effects. In particular, amino acid application under water stress conditions provided the best trade-off among yield, quality, and water productivity, showing both superior performance and high ranking stability. Therefore, integrating organic biostimulants with deficit irrigation management can be considered an effective strategy for improving canola productivity and sustainability in semi-arid environments. Moreover, the multi-criteria decision-making results highlighted that relying solely on individual performance indicators may lead to suboptimal selection of treatments, as different stimulants showed contrasting advantages across yield, oil content, and water productivity. The VIKOR analysis provided a more balanced and integrated ranking by simultaneously considering all evaluated criteria, thereby identifying compromise solutions that best satisfy the conflicting objectives of productivity and resource efficiency.

Cite this article: Mohammadikia, R., Pasandideh, M., 2026. Multicriteria Analysis of the Effect of Organic Growth Stimulants on Canola. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (2), pp 217-234.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372806.819>

Publisher: Soil Science Society of Iran



تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد در کلزا

رضا محمدی کیا^{۱*}  و محمد پسندیده^۱

^۱ مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

واژه‌های کلیدی

اسید آمینه

اسید هیومیک

جلبک دریایی

روش ویکور

ماتریس تصمیم

* ایمیل نویسنده مسئول

rmswri@gmail.com

این مطالعه با هدف ارزیابی اثر محرک‌های آلی رشد بر عملکرد دانه، درصد روغن دانه و بهره‌وری آب کلزا تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش آبی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شد. علاوه بر تجزیه واریانس داده‌ها، رتبه‌بندی تیمارها به روش ویکور (VIKOR) و بررسی پایداری نتایج رتبه‌بندی، با شبیه‌سازی مونت کارلو در ۲۰۰۰ تکرار انجام شد. نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد تنش آبی موجب کاهش ۵/۴ درصدی عملکرد دانه، ۹/۲ درصدی درصد روغن و ۴/۴۶ درصدی بهره‌وری آب نسبت به آبیاری نرمال شد. در مقابل، کاربرد محرک‌های رشد موجب افزایش عملکرد دانه بین ۱۰/۴۷ تا ۱۵/۰۳ درصد، افزایش درصد روغن بین ۵/۷۶ تا ۱۱/۲۶ درصد و افزایش بهره‌وری آب بین ۹/۸۴ تا ۱۷/۲۱ درصد نسبت به شاهد گردید. در بین تیمارها، اسید آمینه در شرایط تنش آبی بیشترین عملکرد دانه (۳۷۰۳ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین بهره‌وری آب (۱/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب) را ایجاد کرد، در حالی که اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال بیشترین عملکرد دانه (۳۸۴۴ کیلوگرم در هکتار) و بیشترین درصد روغن (۴۳/۹ درصد) را نشان داد. نتایج روش ویکور نشان داد تیمار اسید آمینه تحت تنش آبی با کمترین مقدار شاخص ویکور ($Q=۰/۰۲۲$) در رتبه اول قرار گرفت و بهترین گزینه از نظر تعادل بخشی بین شاخص‌های عملکردی و کیفی بود. همچنین تحلیل مونت کارلو نشان داد این تیمار در ۸۲/۶۵ درصد سناریوها رتبه اول را حفظ کرده و از پایداری بالایی برخوردار است.

استناد: محمدی کیا، ر.، پسندیده، م.، ۱۴۰۵. تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد در کلزا. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲)، ۴۰، ص

۲۳۴-۲۱۷

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372806.819>



مقدمه

کلزا (*Brassica napus* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی جهان، سهم قابل‌توجهی در تأمین روغن خوراکی، خوراک دام و مواد اولیه صنایع مختلف دارد و از مهم‌ترین منابع تولید روغن نباتی محسوب می‌شود. توسعه کشت این محصول در بسیاری از کشورها به دلیل ارزش اقتصادی بالا، کیفیت مطلوب روغن و سازگاری نسبی با شرایط اقلیمی مختلف، روندی رو به افزایش داشته است. با این حال، تغییرات اقلیمی، افزایش دمای هوا، کاهش بارندگی و محدودیت منابع آب، پایداری تولید کلزا را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود و شدت و فراوانی آن در دهه‌های اخیر تحت تأثیر تغییر اقلیم افزایش یافته است. کمبود آب با ایجاد اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی، فتوسنتزی و متابولیسم گیاهان، موجب کاهش رشد، عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی می‌شود. در کلزا، تنش خشکی می‌تواند از طریق کاهش توسعه ریشه، محدود شدن فتوسنتز، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی، افزایش تنش اکسیداتیو و کاهش تعداد خورجین، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه، موجب افت معنی‌دار عملکرد دانه و درصد روغن شود (Farooq et al., 2014). همچنین گزارش شده است که افزایش فراوانی و شدت خشکسالی ناشی از تغییر اقلیم، ضرورت توسعه راهکارهای مدیریتی نوین برای افزایش تاب‌آوری گیاهان زراعی را بیش از پیش آشکار ساخته است (Lesk et al., 2016).

در سال‌های اخیر، استفاده از محرک‌های رشد به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر و سازگار با محیط‌زیست در کشاورزی پایدار مورد توجه گسترده قرار گرفته است. محرک‌های رشد گروه متنوعی از ترکیبات آلی و زیستی شامل اسیدهای هیومیک و فولویک، اسیدهای آمینه، عصاره جلبک دریایی، تجزیه‌کننده‌های پروتئینی و میکروارگانیسم‌های محرک رشد هستند که بدون ایفای نقش مستقیم به‌عنوان کود، فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه را تحریک کرده و موجب بهبود رشد، جذب عناصر غذایی، تحمل به تنش و کیفیت محصول می‌شوند (du Jardin, 2015). مطالعات مروری و پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که این ترکیبات از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، تنظیم هورمون‌های گیاهی، بهبود روابط آبی گیاه، افزایش کارایی فتوسنتز و توسعه سیستم ریشه می‌توانند مقاومت گیاهان زراعی را در برابر تنش‌های غیرزیستی، به‌ویژه خشکی، افزایش دهند (Gavelienė & Jurkonienė, 2026; Garcia-Caparrós et al., 2025; Rouphael & Colla, 2020). همچنین گزارش شده است که

کاربرد محرک‌های رشد می‌تواند بهره‌وری آب^۱ (WP)، پایداری غشاهای سلولی، وضعیت آبی گیاه و ظرفیت فتوسنتزی را در شرایط کمبود آب بهبود بخشد و در نهایت منجر به حفظ عملکرد محصولات زراعی شود.

اسید هیومیک یکی از مهم‌ترین ترکیبات آلی مورد استفاده در کشاورزی است که نقش مؤثری در بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد. این ترکیب با افزایش ظرفیت نگهداری آب، بهبود تبادل کاتیونی و افزایش دسترسی عناصر غذایی، شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم می‌کند. همچنین گزارش شده است که اسید هیومیک می‌تواند رشد ریشه، جذب عناصر غذایی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ظرفیت فتوسنتزی را افزایش داده و در نتیجه تحمل گیاه به تنش خشکی را بهبود بخشد (Canellas et al., 2015). در کنار آن، اسیدهای آمینه به‌عنوان پیش‌ساز بسیاری از ترکیبات حیاتی گیاه، در تنظیم اسمزی، سنتز پروتئین‌ها، حفظ پایداری غشا و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو نقش مهمی ایفا می‌کنند (Ma et al., 2026; Henderson et al., 2025; Khan et al., 2019a). علاوه بر این، عصاره جلبک دریایی به دلیل دارا بودن ترکیبات شبه‌هورمونی، پلی‌ساکاریدها، ویتامین‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها، می‌تواند رشد گیاه، بهره‌وری آب و تحمل به تنش را افزایش دهد (Shukla et al., 2019). همچنین گزارش شده است که کاربرد اسید فولویک در کلزا موجب بهبود وضعیت آبی، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی می‌شود (Rahbari et al., 2026).

اگرچه بسیاری از پژوهش‌ها اثرات مثبت محرک‌های رشد را بر عملکرد گیاهان گزارش کرده‌اند، اما پاسخ گیاه به این ترکیبات تحت تأثیر شرایط اقلیمی، شدت تنش، نوع محرک، زمان مصرف و ویژگی‌های ژنتیکی گیاه متغیر است. به همین دلیل، ارزیابی کارایی تیمارهای مختلف تنها بر اساس یک معیار، مانند عملکرد دانه، نمی‌تواند دیدگاه جامعی درباره برتری یک تیمار ارائه دهد. در سامانه‌های کشاورزی پایدار، علاوه بر عملکرد، معیارهایی نظیر درصد روغن، بهره‌وری آب، شاخص‌های اقتصادی، هزینه تولید، بهره‌وری نهاده‌ها و پایداری محیط‌زیستی نیز اهمیت زیادی دارند. از این‌رو، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ (MCDM) در علوم کشاورزی به‌طور چشمگیری گسترش یافته است.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره این امکان را فراهم می‌کنند که چندین شاخص کمی و کیفی به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شوند و گزینه‌های مدیریتی بر اساس مجموعه‌ای از معیارها رتبه‌بندی گردند. در دهه اخیر، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

² Multi-Criteria Decision Making

¹ Water Productivity

موجود عمدتاً به شرایط نرمال یا آزمایش‌های محدود مزرعه‌ای اختصاص داشته و تعمیم‌پذیری آن‌ها به شرایط کم‌آبی با ابهام مواجه است.

بر این اساس، شکاف پژوهشی اصلی در عدم وجود مطالعات جامع مقایسه‌ای چندتیماره تحت شرایط همزمان آبیاری نرمال و تنش خشکی، همراه با ارزیابی چندبعدی عملکرد (زرعی، فیزیولوژیکی) و تحلیل یکپارچه تصمیم‌گیری است. بنابراین، نوآوری مطالعه حاضر در به‌کارگیری روش ویکور برای ادغام همزمان چندین شاخص کلیدی به‌منظور رتبه‌بندی و انتخاب بهترین تیمارهای محرک رشد در شرایط متفاوت آبیاری (نرمال و تنش خشکی) نهفته است. این رویکرد می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به کارایی واقعی محرک‌های رشد فراهم کرده و به توسعه راهکارهای مدیریتی دقیق‌تر برای افزایش پایداری تولید کزلا در شرایط کم‌آبی کمک نماید؛ بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر انواع محرک‌های رشد بر شاخص‌های عملکردی کزلا تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش

منطقه مورد مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی مغان واقع در استان اردبیل قرار دارد. بر اساس داده‌های اقلیمی گزارش شده برای ایستگاه مغان، منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانه حدود ۲۹۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نزدیک به ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در تابستان‌ها دما در برخی روزها به بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و در زمستان نیز کاهش دما تا حدود ۱۶- درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. همچنین، در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند به‌ترتیب ۱، ۱۳، ۸ و ۳ روز یخبندان ثبت شده است. از آنجا که یخبندان و تنش سرمایی می‌تواند با ایجاد آسیب به سلول‌ها و بافت‌ها (در صورتی که دما و مدت سرما از آستانه تحمل عبور کند) منجر به اختلال در فیزیولوژی گیاه و کاهش عملکرد شود، بنابراین توجه به شرایط دمایی و فراوانی یخبندان در این منطقه برای تفسیر نتایج پژوهش ضروری است (Islamic Republic of Iran Meteorological Organization, n.d.; Taiz & Zeiger, 2010; Thomashow, 1999).

طرح آزمایشی

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام گرفت. تیمارهای آبیاری در کرت‌های اصلی و تیمارهای محرک رشد در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. عامل اصلی شامل دو سطح مدیریت زمان

در مطالعات کشاورزی، مدیریت منابع آب، انتخاب تیمارهای آبیاری، ارزیابی سامانه‌های کشت و مدیریت پایدار خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این روش‌ها قادرند در شرایط پیچیده و چندبعدی، تصمیم‌گیری را دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر سازند و گزینه‌های بهینه را با در نظر گرفتن تعادل میان معیارهای متعارض شناسایی کنند (Zolfani & Saparauskas, 2013).

در میان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش ویکور^۳ (VIKOR) به دلیل توانایی ارائه راه‌حل سازشی و انتخاب گزینه نزدیک به وضعیت ایده‌آل، جایگاه ویژه‌ای در مسائل پیچیده تصمیم‌گیری در علوم کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی یافته است. این روش با ترکیب معیارهای مطلوبیت گروهی و حداقل‌سازی نارضایتی فردی، امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها را در شرایطی فراهم می‌سازد که معیارهای تصمیم‌گیری دارای ماهیت متضاد و ناهمگن باشند (Opricovic & Tzeng, 2004).

در سال‌های اخیر، کاربرد روش ویکور در حوزه‌های مختلف مدیریت منابع آب، کشاورزی پایدار و بهینه‌سازی سیستم‌های تولید به‌طور قابل‌توجهی گسترش یافته است. به‌عنوان مثال، این روش در ارزیابی راهکارهای مدیریت آب و انرژی پایدار با رویکرد چندمعیاره مورد استفاده قرار گرفته و توانسته است گزینه‌های بهینه را تحت شرایط چندهدفه و متضاد شناسایی کند (Shafik et al., 2025). همچنین در مدیریت منابع آب کشاورزی، ترکیب مدل‌های هیدروکشاورزی با روش ویکور برای انتخاب راهکارهای بهینه آبیاری و کاهش تنش شوری و کم‌آبی به‌کار رفته و کارایی بالای این روش در شرایط عدم قطعیت را نشان داده است (Wu et al., 2023; Zhang et al., 2023). علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از ویکور در کنار سایر روش‌های فازی و بهینه‌سازی، قابلیت بالایی در انتخاب گزینه‌های مدیریتی در سیستم‌های کشاورزی و محیطی دارد و می‌تواند تصمیم‌گیری را در شرایط پیچیده و چندمعیاره بهبود دهد (Zhang et al., 2023).

با وجود گسترش کاربرد روش ویکور در مطالعات مدیریتی و محیطی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه کشاورزی یا بر بهینه‌سازی منابع آب متمرکز بوده‌اند یا از شاخص‌های محدود برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده کرده‌اند. همچنین در بسیاری از مطالعات، تلفیق همزمان شاخص‌های زراعی، فیزیولوژیکی، کیفی در قالب یک چارچوب یکپارچه تصمیم‌گیری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، در شرایط تنش خشکی که اثرگذاری محرک‌های رشد به‌شدت وابسته به وضعیت رطوبتی خاک است، نتایج مطالعات

³ VIŠekriterijumsko KOMPromisno Rangiranje

ویژگی خاک

به‌منظور تعیین وضعیت اولیه خاک، قبل از کاشت از لایه سطحی خاک (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) نمونه مرکب تهیه شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در هوای آزاد و عبور از الک دو میلی‌متری، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد تجزیه قرار گرفتند. بافت خاک مطابق روش Gee & Bauder (1986)، کربن آلی بر اساس روش Nelson & Sommers (1996)، عناصر کم‌مصرف به روش Lindsay & Norvell (1978)، آهک معادل طبق روش Loeppert & Suarez (1996)، اسیدیته و هدایت الکتریکی مطابق روش Rhoades (1982)، پتاسیم قابل جذب بر اساس روش Olsen & Helmke Sparks (1996) و فسفر قابل جذب به روش Sommers (1982) و نتایج حاصل از تجزیه خاک در (جدول ۱) ارائه شده است.

آبیاری بود؛ به‌طوری‌که در تیمار بدون تنش^۴ (NI)، آبیاری پس از ۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A انجام شد، در حالی‌که در تیمار تنش آبی^۵ (WS)، دور آبیاری تا رسیدن تبخیر تجمعی به ۱۳۰ میلی‌متر به تأخیر افتاد.

این انتخاب بر اساس پژوهش‌های پیشین بود که نشان می‌دهند افزایش فاصله بین آبیاری‌ها و تبخیر تجمعی باعث کاهش رطوبت قابل‌استفاده خاک و در نتیجه ایجاد تنش آبی در گیاه می‌شود (Taha et al., 2011; Lakhawat et al., 2024). عامل فرعی پنج تیمار تغذیه‌ای شامل شاهد (Control)، محلول‌پاشی اسیدآمینه (Amino acid)، کود آبیاری اسید هیومیک (Humic acid)، محلول‌پاشی اسید فولویک (Fulvic acid) و محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی (Seaweed extract) بود که به‌صورت تصادفی در کرت‌هایی با مساحت ۱۲ مترمربع با چهار ردیف کشت زیر هر کرت اصلی با مساحت ۶۰ مترمربع قرار گرفتند. این ترکیبات در دو مرحله کلیدی رشد کلزا، شامل مرحله خروج از روزت و آغاز گلدهی، به کار گرفته شدند. تمامی محلول‌پاشی‌ها با غلظت پنج در هزار انجام شد. در تیمار کاربرد اسید هیومیک، در هر کرت مقدار شش گرم اسید هیومیک به‌صورت کودآبیاری در دو مرحله رشدی خروج از روزت و شروع گلدهی به خاک داده شد.

ویژگی محرک‌های رشد

در این پژوهش از چهار زیست‌محرک گیاهی تجاری شامل اسید هیومیک، اسید فولویک، اسید آمینه و عصاره جلبک دریایی استفاده شد. پیش از اجرای آزمایش، درصد ماده مؤثره هر یک از زیست‌محرک‌ها در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات کشاورزی اندازه‌گیری شد. بر این اساس، محصول اسید هیومیک حاوی ۵۳ درصد اسید هیومیک، محصول اسید فولویک حاوی ۲۲/۱ درصد اسید فولویک، فرآورده اسید آمینه حاوی ۳۶/۸ درصد اسید آمینه آزاد و عصاره جلبک دریایی حاوی ۱۰ درصد اسید آلژینیک بود. سایر ترکیبات موجود در فرمولاسیون این فرآورده‌ها، از جمله مواد حامل و ترکیبات جانبی، در این پژوهش اندازه‌گیری نشدند.

⁵ Water stress

⁴ Normal Irrigation

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قطعات آزمایشی.

Table 1- Some physical and chemical properties of soil in the experimental plots.

عمق خاک	بافت خاک	اسیدیته	هدایت الکتریکی	کربنات کلسیم	ماده آلی	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	آهن	روی	منگنز	مس
Soil Depth (cm)	Soil Texture	pH	EC (dS m ⁻¹)	معادل TNV (%)	OC (%)	P+	K+	Fe	Zn	Mn	Cu
mg kg ⁻¹											
0-30	CL	7.8	1.34	5.7	0.9	15.2	521	3.2	0.13	10.6	1.6

نتایج آزمون خاک نشان داد که خاک منطقه دارای واکنش کمی قلیایی ($pH = 7/8$) و هدایت الکتریکی $1/34$ دسی‌زیمنس بر متر بود که به ترتیب بیانگر آهکی بودن و غیرشور بودن خاک مورد مطالعه است. چنین شرایطی در بسیاری از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج بوده و اگرچه برای کشت کلزا محدودیت جدی ایجاد نمی‌کند، می‌تواند فراهمی برخی عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه آهن و روی را کاهش دهد (Marschner, 2012; Havlin et al., 2014). همچنین، پایین بودن ماده آلی خاک ($0/9$ درصد) و وجود $5/7$ درصد آهک معادل، بیانگر فقر نسبی خاک از نظر ماده آلی و حاکم بودن شرایط آهکی در خاک مورد مطالعه بود. غلظت فسفر قابل جذب در محدوده مناسب ($15/2$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پتاسیم قابل جذب در سطح بالایی (521 میلی‌گرم بر کیلوگرم) قرار داشت (Havlin et al., 2014; Brady & Weil, 2016) که نشان‌دهنده وضعیت مناسب خاک از نظر این دو عنصر، به‌ویژه پتاسیم، است. در مقابل، غلظت آهن و به‌ویژه روی کمتر از سطوح بحرانی گزارش شده برای خاک بود؛ به‌طوری‌که سطح بحرانی آهن قابل جذب حدود $4/5$ تا 5 میلی‌گرم بر کیلوگرم (Lindsay and Norvell, 1978) و سطح بحرانی روی قابل جذب حدود $0/5$ تا 1 میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Alloway, 2008). بنابراین، کمبود نسبی عناصر ریزمغذی، به‌ویژه روی را می‌توان از مهم‌ترین محدودیت‌های تغذیه‌ای این خاک دانست، در حالی‌که منگنز و مس در محدوده مناسب تغذیه‌ای قرار داشتند.

عملیات زراعی

پس از آماده‌سازی زمین شامل عملیات شخم، دیسک و تسطیح، کلزا رقم آزاد گرده‌افشان دلگان در نیمه دوم مهرماه کشت شد. با توجه به نتایج آزمون خاک و به‌منظور تأمین نیاز غذایی گیاه کلزا، برنامه کودی آزمایش بر اساس وضعیت حاصلخیزی خاک تنظیم شد. بدین منظور، کود اوره به‌عنوان منبع نیتروژن در مجموع به مقدار 150 کیلوگرم در هکتار و در سه مرحله شامل پیش از کاشت به‌صورت پایه، مرحله ریز و مرحله ساقه‌رفتن (هر بار 50 کیلوگرم در هکتار) مصرف شد. همچنین، با توجه به واکنش کمی قلیایی خاک، پایین بودن ماده آلی و کمبود عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی و آهن، محلول‌پاشی سولفات روی

و سولفات آهن با غلظت سه در هزار در دو مرحله فنولوژیکی خروج از ریز و پیش از گلدهی انجام شد تا نیاز گیاه به این عناصر تأمین و از بروز آثار سوء کمبود آن‌ها بر رشد و عملکرد جلوگیری شود.

فسفر قابل جذب خاک بر اساس دامنه‌های کفایت گزارش شده برای بسیاری از خاک‌های زراعی، بیانگر کمبود شدید فسفر نبود. از این رو، به‌منظور جلوگیری از ایجاد اثر مداخله‌گر ناشی از مصرف کود فسفر و فراهم شدن امکان ارزیابی دقیق اثر تیمارهای آزمایش، از مصرف کود فسفر خودداری شد. با توجه به بالا بودن پتاسیم قابل جذب خاک، مصرف کود پتاسه در این آزمایش ضروری تشخیص داده نشد. همه تیمارها تحت شرایط یکسان از نظر حاصلخیزی اولیه خاک مدیریت شدند تا تفاوت‌های مشاهده‌شده تنها ناشی از تیمارهای مورد بررسی باشد.

در انتهای فصل رشد، شاخص‌های اصلی مورد بررسی شامل عملکرد دانه، درصد روغن، آب مصرفی و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شدند. برای تعیین مقدار آب هر نوبت آبیاری، رطوبت حجمی خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه بازتاب‌سنجی در حوزه زمان (Time Domain Reflectometry; TDR) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری شد و مقدار آن طوری تنظیم گردید که رطوبت خاک دوباره به ظرفیت زراعی برسد. مقدار آب داده شده با کنتور اندازه‌گیری شد. برای تعیین عملکرد دانه، محصول برداشت‌شده از سطحی معادل $1/5$ مترمربع از هر کرت توزین و سپس به واحد کیلوگرم در هکتار تبدیل شد. درصد روغن دانه نیز با استفاده از روش سوکسله و با به‌کارگیری حلال دی‌اتیل اتر خشک در دمای 45 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری گردید. بهره‌وری آب از نسبت عملکرد دانه به حجم کل آب مصرف‌شده محاسبه شد و به‌صورت کیلوگرم محصول به ازای هر مترمکعب آب بیان گردید (Yadav et al., 2024).

تجزیه و تحلیل آماری

پیش از تجزیه مرکب داده‌ها، یکنواختی واریانس خطاها بین دو سال بررسی شد و امکان ادغام داده‌ها تأیید گردید. سپس با توجه به عدم معنی‌داری اثر متقابل سال در تیمار در صفات مورد مطالعه، داده‌های دو سال به‌صورت مرکب تجزیه

تصمیم تنظیم شده و سپس به منظور حذف اثر واحدهای مختلف، داده‌ها نرمال‌سازی گردیدند. در ادامه، با اعمال وزن‌های مساوی برای تمام معیارها، ماتریس تصمیم وزن‌دار تشکیل شد.

در تحلیل چندمعیاره، هر معیار با یک وزن مشخص اهمیت نسبی خود را در تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای سادگی و شفافیت، وزن همه معیارها برابر (یکسان) در نظر گرفته شد، زیرا هدف بررسی اثر کلی تیمارهای محرک رشد روی مجموعه‌ای از صفات کمی و کیفی بود و تمایل داشتیم هیچ معیاری به صورت پیش‌فرض بر دیگر معیارها غلبه نکند. این انتخاب همچنین امکان مقایسه مستقیم تیمارها در شرایط مختلف آبیاری را فراهم می‌کند و اثرات تنش آبی یا تیمار محرک رشد را به صورت متعادل ارزیابی می‌کند.

معیارهای ماتریس تصمیم در جهت مثبت (بیشتر بهتر) و منفی (کمتر بهتر) تعریف شدند، بدین معنی که معیار مثبت به معنای بیشتر بهتر و معیار منفی به معنای کمتر بهتر بود. با این رویکرد، مقادیر معیارهای منفی قبل از محاسبه شاخص ویکور معکوس یا نرمال‌سازی شدند تا جهت همه معیارها به سمت افزایش مطلوبیت باشد. سپس این ماتریس مبنا قرار گرفت تا مراحل روش ویکور مطابق استاندارد آن انجام شود. بر همین اساس، برای هر تیمار (گزینه)، فاصله آن از دو حالت فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی محاسبه گردید.

وارianس شدند. از این رو، به منظور افزایش دقت آماری، کاهش اثر تغییرات محیطی سالانه و دستیابی به نتایج قابل اعتمادتر، تفسیر نهایی داده‌ها بر اساس نتایج تجزیه مرکب دو ساله انجام شد. مقایسه میانگین‌ها نیز برای اثرات معنی‌دار با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال خطای ۵ درصد انجام گرفت. با توجه به اینکه اثر متقابل عوامل اصلی در فرعی معنی‌دار بود مقایسه میانگین اثرات اصلی با روش LSMeans انجام شد تا اثر برهمکنش عوامل را حذف و مقایسه دارای اعتبار گردد.

تحلیل چندمعیاره به منظور شناسایی تیمار برتر

روش ویکور یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با هدف ارائه یک راه‌حل سازشی بین معیارهای متعارض توسعه یافته است. این روش بر مفهوم نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل تکیه دارد و گزینه‌ای را به عنوان بهترین انتخاب معرفی می‌کند که کمترین فاصله را از حالت ایده‌آل داشته باشد (Opricovic & Tzeng, 2004). در این روش، در مرحله نخست، ماتریس تصمیم‌گیری شامل ۱۰ گزینه حاصل از ترکیب دو سطح آبیاری (نرمال و تنش آبی) و پنج تیمار محرک رشد (شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی) تشکیل گردید. معیارهای ارزیابی شامل بهره‌وری آب، درصد روغن دانه، آب مصرفی و عملکرد دانه در نظر گرفته شدند (جدول ۲). مقادیر مربوط به هر گزینه در قالب ماتریس اولیه

جدول ۲- ماتریس تصمیم‌گیری برای ارزیابی تیمارهای کلزا.

Table 2- Decision-making matrix for evaluating canola treatments.

عملکرد دانه Seed yield (kg h ⁻¹) (+)	آب مصرفی Water Use (m ³ h ⁻¹) (-)	درصد روغن دانه Seed oil percentage (+)	بهره‌وری آب Water Productivity (kg m ⁻³) (+)	تیمارها (آبیاری × محرک رشد) Treatments (Irrigation × Growth stimulant)
3369	3239.42	40.6	1.04	نرمال × شاهد (NI × Control)
3502	3272.90	42.8	1.07	نرمال × اسید آمینه (NI × Amino acid)
3844	3230.25	43.9	1.19	نرمال × اسید هیومیک (NI × Humic acid)
3579	3224.32	41.4	1.11	نرمال × اسید فولویک (NI × Fulvic acid)
3569	3244.55	42.8	1.10	نرمال × جلبک دریایی (NI × Seaweed extract)
3002	2144.29	36.7	1.40	تنش آبی × شاهد (WS × Control)
3703	2068.72	41.1	1.79	تنش آبی × اسید آمینه (WS × Amino acid)
3422	2099.39	41.2	1.63	تنش آبی × اسید هیومیک (WS × Humic acid)
3411	2092.64	39.5	1.63	تنش آبی × اسید فولویک (WS × Fulvic acid)
3544	2097.04	41.3	1.69	تنش آبی × جلبک دریایی (WS × Seaweed extract)

NI=Normal Irrigation
WS=Water Stress

محاسبه گردید. این فرایند در ۲۰۰۰ تکرار مستقل انجام شد و در نهایت فراوانی قرار گرفتن هر تیمار در رتبه اول به عنوان شاخص پایداری و استحکام رتبه‌بندی محاسبه شد. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ و ترسیم نمودارها در پایتون صورت پذیرفت.

نتایج تجزیه و تحلیل آماری

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۳) نشان داد که اثر سال بر هیچ‌یک از صفات مورد بررسی (بهره‌وری آب، درصد روغن دانه و عملکرد دانه) معنی‌دار نبود که بیانگر یکنواختی نسبی شرایط محیطی در دو سال آزمایش و امکان تجمیع داده‌ها برای تحلیل مرکب بود.

اثر آبیاری بر هر سه صفت در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود که نشان داد تنش آبی به صورت معنادار بر کاهش عملکرد و تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیک کلزا اثر گذاشته است. اثر محرک‌های رشد در سطح یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$) که بیانگر نقش بسیار مهم این تیمارها در بهبود عملکرد و بهره‌وری آب است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های زیستی و آلی می‌تواند اثر محدودکننده تنش آبی را تا حدی جبران کند.

همچنین اثر متقابل آبیاری × محرک رشد برای عملکرد دانه و بهره‌وری آب معنی‌دار بود که نشان‌دهنده وابستگی پاسخ تیمارهای محرک رشد به شرایط رطوبتی است. به بیان دیگر، کارایی محرک‌ها در شرایط تنش آبی و نرمال یکسان نبوده و واکنش گیاه به تیمارها تحت تأثیر وضعیت آبیاری تغییر کرده است. عدم معنی‌داری اثر متقابل سال با سایر عوامل (سال در آبیاری و سال در محرک رشد) نشان‌دهنده پایداری پاسخ تیمارها در طول دو سال آزمایش است.

در این روش، ابتدا بهترین و بدترین مقادیر هر معیار تعیین و مجموع فاصله‌های نرمال شده وزنی (S_i) و حداکثر فاصله وزنی (R_i) برای هر تیمار از روابط زیر محاسبه گردید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن f_j^* : بهترین مقدار معیار j ، f_j^- : بدترین مقدار معیار j ، f_{ij} : مقدار معیار j برای گزینه i ، w_j : وزن معیار j و n : تعداد معیارهاست.

سپس شاخص ویکور (Q) به عنوان معیار نهایی رتبه‌بندی، با در نظر گرفتن وزن استراتژی توافقی ($v = 0.5$)، محاسبه شد. تیمار دارای کمترین مقدار شاخص ویکور به عنوان گزینه برتر از رابطه (۳) تعیین شد.

$$Q_i = \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (-v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه $R^* = \min_i R_i$ ، $S^- = \max_i S_i$ ، $S^* = \min_i S_i$ و $R^- = \max_i R_i$ وزن استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است. پس از محاسبه این فواصل، شاخص‌های اصلی روش ویکور یعنی S ، R و Q به دست آمدند. S به عنوان معیار عملکرد کلی گزینه بر اساس مجموع فاصله‌ها در نظر گرفته می‌شود. R نشان‌دهنده بدترین وضعیت یا بیشترین ناپایداری گزینه نسبت به معیارها است (نقش معیار ضعیف‌تر در تصمیم‌گیری). Q شاخص نهایی سازش است که ترکیبی از S و R بوده و در واقع تعادلی بین عملکرد کلی و بدترین عملکرد گزینه فراهم می‌کند. در نهایت، با استفاده از مقادیر شاخص Q تیمارها بر اساس راحل سازشی رتبه‌بندی شدند؛ به طوری که کمترین مقدار Q بیانگر بهترین گزینه (نزدیک‌ترین گزینه به راحل ایده‌آل و با بیشترین سازگاری بین معیارها) بود.

تحلیل پایداری نتایج رتبه‌بندی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

به منظور بررسی پایداری نتایج رتبه‌بندی در برابر عدم قطعیت در اهمیت معیارها، تحلیل حساسیت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو انجام شد. در این روش، وزن معیارها به صورت تصادفی و با استفاده از توزیع دیریکله تولید شد به گونه‌ای که مجموع وزن‌ها در هر تکرار برابر یک باشد. سپس برای هر مجموعه وزن تولید شده، روش ویکور اجرا و رتبه تیمارها

جدول ۳- تجزیه واریانس مرکب (میانگین مربعات) بهره‌وری آب و برخی صفات کلزا.

Table 3- Combined analysis of variance (mean squares) for water use efficiency and some canola traits.

عملکرد دانه Seed yield	روغن دانه Seed oil content	بهره‌وری آب Water Productivity	درجه آزادی df	منابع تغییر Source of variation
86415 ns	9.8 ns	0.21 ns	1	سال (Year)
29541 ns	1.4 ns	0.03 ns	4	بلوک (سال) (Block (Year)
142830 *	28.4 *	0.49 *	1	آبیاری (A) (Irrigation (A)
22184 ns	3.1 ns	0.06 ns	1	سال × آبیاری (Year × Irrigation)
50458	3.9	0.07	4	خطای کرت اصلی (Main plot error)
497319 **	20.8 **	0.47 **	5	محرک رشد (B) (Growth stimulant (B)
36451 ns	2.7 ns	0.05 ns	5	سال × محرک رشد (Year × Growth stimulant)
92483 **	5.2 *	0.09 *	5	آبیاری × محرک رشد (Irrigation × Growth stimulant)
18736 ns	1.8 ns	0.03 ns	5	سال × آبیاری × محرک رشد (Year × Irrigation × Growth stimulant)
10898	2.3	0.04	40	خطای کرت فرعی (Sub-plot error)
2.94	3.34	3.83	-	ضریب تغییرات (Coefficient of variation (%))

ns, * و ** به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

ns, * and ** respectively indicate non-significance, significance at the 5% probability level, and significance at the 1% probability level.

اثرات اصلی فاکتورها (تیمار آبیاری و محرک رشد) بر صفات کمی و کیفی کلزا

نتایج مقایسه میانگین دو سال (جدول ۴) نشان داد که تیمار آبیاری نرمال نسبت به تنش آبی منجر به افزایش هر سه صفت شد؛ به‌طوری‌که بهره‌وری آب (۱/۱۲ در برابر ۱/۰۷)، درصد

روغن (۴۳/۵ در برابر ۳۹/۵) و عملکرد دانه (۳۶۶۸ در برابر ۳۴۷۰ کیلوگرم در هکتار) در شرایط آبیاری نرمال بالاتر بود. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه گیاه در شرایط تنش آبی قادر به حفظ نسبی بهره‌وری آب بوده، اما کاهش قابل توجهی در کیفیت و عملکرد دانه رخ داده است.

جدول ۴- اثر اصلی تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر صفات مورد بررسی.

Table 4. Main effects of irrigation treatments and growth stimulants on the studied traits.

عملکرد دانه Seed yield (kg h ⁻¹)	درصد روغن دانه Seed oil content	بهره‌وری آب Water Productivity (kg m ⁻³)	تیمار Treatment	فاکتورها Factors
3668 a	43.5 a	1.12 a	آبیاری نرمال (NI)	تیمار آبیاری Irrigation treatment
3470 b	39.5 b	1.07 b	تنش آبی (WS)	
3153 c	38.2 c	1.22 c	شاهد (Control)	محرک رشد Growth stimulant
3594 a	41.9 a	1.43 a	اسید آمینه (Amino acid)	
3627 a	42.5 a	1.40 a	اسید هیومیک (Humic acid)	
3483 b	40.4 b	1.34 b	اسید فولویک (Fulvic acid)	
3550 ab	41.8 ab	1.39 a	عصاره جلبک دریایی (Seaweed extract)	

NI=Normal Irrigation

WS=Water Stress

فیزیولوژیک گیاه است. در مقابل، تیمار شاهد کمترین مقادیر را در هر سه صفت نشان داد که تأییدکننده اثر مثبت محرک‌های رشد در بهبود عملکرد کلزا است.

در بین محرک‌های رشد، تیمار اسید آمینه و اسید هیومیک بیشترین تأثیر را بر بهبود بهره‌وری آب و عملکرد دانه داشتند. به‌طور مشخص، اسید آمینه با مقدار ۱/۴۳ بیشترین بهره‌وری آب و همچنین عملکرد بالاتر نسبت به شاهد را ایجاد کرد. اسید هیومیک نیز علاوه بر بهبود بهره‌وری آب، بیشترین درصد روغن دانه (۴۲/۵ درصد) و عملکرد بالا (۳۶۲۷ کیلوگرم در هکتار) را نشان داد که بیانگر نقش آن در بهبود تغذیه و فعالیت‌های

اثر برهمکنش آبیاری در محرک رشد

نتایج برهمکنش آبیاری در محرک رشد (جدول ۵) نشان داد که پاسخ محرک‌های رشد به شرایط آبیاری متفاوت بوده است. در شرایط آبیاری نرمال، بیشترین عملکرد دانه مربوط به تیمار اسید هیومیک (۳۸۴۴ کیلوگرم در هکتار) بود که در بالاترین گروه آماری قرار گرفت. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط بدون تنش، اسید هیومیک بیشترین توان افزایش عملکرد را دارد.

در مقابل، در شرایط تنش آبی، اسید آمینه بیشترین بهره‌وری آب (۱/۷۹) و بالاترین عملکرد دانه (۳۷۰۳ کیلوگرم در هکتار) را ایجاد کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که اسید آمینه در شرایط محدودیت آب نقش مؤثرتری در بهبود بهره‌وری آب و حفظ عملکرد دارد. اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی نیز در شرایط آبی عملکرد مناسبی نشان دادند، اما اثر آن‌ها کمتر از اسید آمینه بود. تیمار شاهد در هر دو شرایط کمترین عملکرد را داشت که نشان‌دهنده نقش محدودکننده عدم استفاده از محرک‌های رشد است.

جدول ۵- تأثیر برهمکنش تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر صفات مورد بررسی.

Table 5. Interaction effects of irrigation treatments and growth stimulants on the studied traits.

عملکرد دانه Seed yield (kg h ⁻¹)	درصد روغن دانه Seed oil content	بهره‌وری آب Water Productivity (kg m ⁻³)	محرک رشد Growth stimulant	تیمار آبیاری Irrigation treatment
3369 c	40.6 b	1.04 c	شاهد (Control)	آبیاری نرمال (NI)
3502 b	42.8 a	1.07 c	اسید آمینه (Amino acid)	
3844 a	43.9 a	1.19 a	اسید هیومیک (Humic acid)	
3579 ab	41.4 b	1.11 b	اسید فولویک (Fulvic acid)	
3569 ab	42.8 a	1.10 b	عصاره جلبک دریایی (Seaweed extract)	
3002 c	36.7 c	1.40 c	شاهد (Control)	تنش آبی (WS)
3703 a	41.1 ab	1.79 a	اسید آمینه (Amino acid)	
3422 b	41.2 ab	1.63 b	اسید هیومیک (Humic acid)	
3411 b	39.5 b	1.63 b	اسید فولویک (Fulvic acid)	
3544 ab	41.3 a	1.69 ab	عصاره جلبک دریایی (Seaweed extract)	

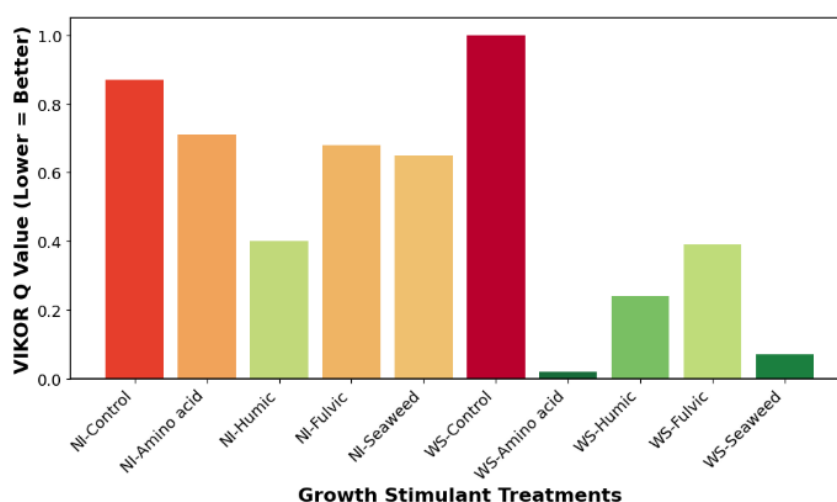
NI=Normal Irrigation

WS=Water Stress

قرار گرفته است؛ بنابراین این تیمار نه تنها کمترین مجموع فاصله از وضعیت ایده‌آل را دارد (S پایین)، بلکه حتی در بدترین معیار نیز بهترین عملکرد را نشان داده است (R پایین). در نتیجه، این تیمار به عنوان بهترین راه‌حل سازشی شناخته می‌شود که هم‌زمان هم عملکرد کلی مطلوب و هم تعادل مناسبی بین معیارهای مختلف دارد. تیمارهای جلبک دریایی در شرایط تنش و هیومیک در شرایط تنش به ترتیب با مقادیر Q برابر ۰/۰۷۵ و ۰/۲۴۵ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند.

رتبه‌بندی تیمارها

نتایج رتبه‌بندی تیمارها به روش ویکور (شکل ۱) نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه بین تیمارهای ترکیبی آبیاری و محرک‌های رشد از نظر شاخص نهایی تصمیم‌گیری (Q) است؛ به‌طوری‌که هرچه مقدار Q کمتر باشد، گزینه به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر و از نظر عملکردی مطلوب‌تر است. تیمار اسید آمینه تحت شرایط تنش آبی با کمترین مقادیر شاخص‌های (S=۰/۵۵۶، R=۰/۳۸۹۹ و Q=۰/۰۲۲) در رتبه اول



شکل ۱- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد تحت سطوح مختلف آبیاری و محرک رشد.

Figure 1. Ranking of growth stimulant treatments under different irrigation levels and growth stimulants.

شرایط آبیاری کامل ارائه دهند. در میان تیمارهای تحت آبیاری کامل (بدون تنش)، تیمار اسید هیومیک در شرایط بدون تنش با $Q=0/406$ بهترین رتبه (پنجم) را به خود اختصاص داده است. با این حال، مقایسه مستقیم نشان می‌دهد که همه تیمارهای تحت تنش آبی به جز شاهد تحت تنش آبی رتبه‌های بهتری نسبت به

این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد محرک‌های رشد تحت شرایط تنش آبی به طور کلی عملکرد بهتری نسبت به شرایط آبیاری کامل (بدون تنش) داشته است. جالب توجه است که حتی در شرایط تنش، تیمارهای محرک رشد (به ویژه اسید آمینه و جلبک دریایی) توانسته‌اند عملکرد بهتری نسبت به تیمارهای مشابه در

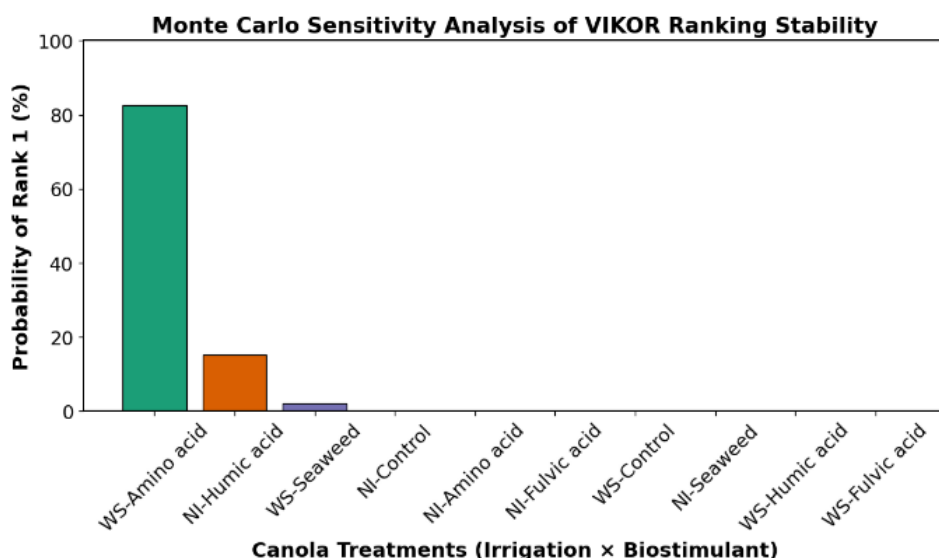
اسید آمینه تحت تنش آبی با اختلاف بسیار زیاد بیشترین پایداری را در کسب رتبه اول نشان داد، به‌طوری‌که در ۸۲/۶۵ درصد از سناریوهای وزنی در جایگاه نخست قرار گرفت. این نتیجه بیانگر برتری قوی و پایدار این تیمار تحت شرایط مختلف اهمیت‌دهی به معیارهای عملکرد، درصد روغن، بهره‌وری آب و آب مصرفی بود.

در مقابل، تیمار اسید هیومیک تحت آبیاری نرمال تنها در ۱۵/۳ درصد از حالات شبیه‌سازی رتبه اول را به خود اختصاص داد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب اما ناپایدارتر آن در مقایسه با تیمار اسید آمینه تحت تنش آبی است. همچنین تیمار جلبک دریایی تحت تنش آبی با سهم بسیار محدود ۲/۰۵ درصدی تنها در تعداد کمی از سناریوها توانسته به رتبه برتر دست یابد که نشان‌دهنده حساسیت بالای آن نسبت به تغییر وزن معیارها است. سایر تیمارها در هیچ‌یک از سناریوهای شبیه‌سازی موفق به کسب رتبه اول نشدند که این موضوع بیانگر ضعف نسبی آن‌ها در مقایسه با تیمارهای برتر و همچنین پایداری پایین آن‌ها در برابر تغییرات وزن معیارها است.

تیمارهای مشابه در شرایط بدون تنش کسب کرده‌اند. این امر احتمالاً نشان‌دهنده کارایی بالاتر محرک‌های رشد در شرایط تنش برای بهبود شاخص‌های مورد بررسی است. تیمارهای شاهد بدون تنش و شاهد تحت تنش به ترتیب با مقادیر Q برابر ۰/۸۷۳ و ۱/۰۰۰ در رتبه‌های نهم و دهم قرار گرفته‌اند. این نتیجه به وضوح نشان می‌دهد که عدم استفاده از محرک‌های رشد در هر دو شرایط آبیاری (با تنش یا بدون تنش) منجر به بدترین عملکرد می‌شود. همچنین، شاهد تحت تنش با بیشترین مقدار شاخص ویکور ($Q=1$) به عنوان بدترین گزینه شناسایی شده است که نشان می‌دهد ترکیب تنش آبی با عدم استفاده از محرک رشد، بیشترین فاصله را از وضعیت ایده‌آل دارد.

ارزیابی حساسیت رتبه‌بندی تیمارها به تغییر وزن معیارها

نتایج تحلیل مونت کارلو (شکل ۲) نشان‌دهنده پایداری قابل توجه اما ناهمگون در رتبه‌بندی تیمارهای کلزا تحت عدم قطعیت وزن معیارها است. بر اساس ۲۰۰۰ تکرار شبیه‌سازی مونت کارلو، تیمار



شکل ۲- تحلیل حساسیت مونت کارلو بر پایداری رتبه‌بندی تیمارهای کلزا.
Figure 2. Monte Carlo Sensitivity Analysis of Ranking Stability of Canola Treatments.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش آبی به‌عنوان عامل اصلی، باعث کاهش معنی‌دار برخی صفات عملکردی کلزا شد و در عین حال بر شاخص‌های مرتبط با کیفیت دانه و بهره‌وری آب نیز اثر گذاشت. کاهش رطوبت در اختیار گیاه می‌تواند با محدود کردن فتوسنتز، کاهش رشد سطح برگ و افت تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌کننده (دانه) موجب افت عملکرد نهایی شود. این موضوع با گزارش‌های پیشین نیز هم‌سو است،

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تیمار اسید آمینه تحت تنش آبی نه‌تنها از نظر مقدار شاخص ویکور عملکرد برتری دارد، بلکه از نظر پایداری تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت وزن‌ها نیز کاملاً قابل اعتماد و غالب است، در حالی که سایر تیمارها به‌ویژه تیمارهای شاهد و برخی محرک‌های رشد در شرایط مختلف وزن‌دهی حساسیت بالایی از خود نشان داده و از رقابت برای رتبه نخست خارج شده‌اند.

یکی دیگر از نکات مهم این پژوهش، نقش بهره‌وری آب در کنار عملکرد است. در بسیاری از شرایط کم‌آبی، ممکن است عملکرد کاهش یابد، اما نسبت عملکرد به مقدار آب مصرفی (بهره‌وری آب) تغییر کرده و حتی در برخی موارد افزایش یابد (Passioura, 2006). نتایج این مطالعه نشان داد که محرک‌های زیستی نه تنها میزان تولید را تحت تأثیر قرار داده‌اند، بلکه احتمالاً باعث بهینه شدن استفاده از منابع محدود (به‌ویژه آب) در مراحل حساس رشد شده‌اند. از نظر فیزیولوژیک، این موضوع می‌تواند ناشی از تعدیل هدایت روزنه‌ای، کاهش آسیب اکسیداتیو و بهبود وضعیت تغذیه‌ای باشد؛ عواملی که در مجموع سبب می‌شوند گیاه در شرایط تنش، کارآمدتر از قبل عمل کند.

همچنین، در تفسیر نتایج باید به الگوی وقوع بارش یا نوسانات رطوبتی در طول فصل رشد توجه شود. تنش آبی در بسیاری از سامانه‌های زراعی به صورت پیوسته و ثابت اتفاق نمی‌افتد و ممکن است در برخی مراحل با بارش‌های مقطعی کاهش پیدا کند. چنین شرایطی می‌تواند شدت اختلاف بین رژیم‌های رطوبتی را تعدیل کند و در نتیجه باعث شود اثر سال یا تعامل سال در تیمار کمتر مشاهده شود؛ بنابراین، پاسخ گیاه به محرک‌ها را باید در چارچوب هم‌زمان مدیریت آبیاری و رفتار اقلیمی تفسیر کرد.

زیرا در شرایط کم‌آبی معمولاً هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و در نتیجه جذب دی‌اکسیدکربن و کارایی فتوسنتزی افت می‌کند (Farooq et al., 2009; Ashraf & Harris, 2013).

در بخش مربوط به اثر رژیم آبیاری، مشاهده شد که گیاه تحت شرایط تنش قادر به حفظ کامل عملکرد نبوده و اختلاف بین رژیم‌ها در برخی صفات برجسته‌تر شده است. با این حال، عدم مشاهده معنی‌داری برخی اثرات سال و تعامل سال در تیمار نشان می‌دهد که پاسخ کلی گیاه به تیمارهای زیستی تا حدی تحت کنترل مدیریتی بوده و صرفاً تابع تغییرات اقلیمی هر سال نیست. این یافته می‌تواند بیانگر پایداری اثر تیمارهای محرک رشد در شرایط محیطی متفاوت باشد، به‌طوری‌که مدیریت تغذیه‌ای به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده، بخشی از افت ناشی از محدودیت آب را کنترل کرده است (Anjum et al., 2017).

نتایج تیمارهای محرک رشد نشان داد که اثر آن‌ها وابسته به رژیم رطوبتی است و به‌صورت ثابت برای همه شرایط ظاهر نمی‌شود. در شرایط آبیاری نرمال (NI) اسید هیومیک بیشترین اثر مثبت را بر عملکرد و برخی شاخص‌های مرتبط با کیفیت نشان داد؛ این امر می‌تواند به توانایی اسید هیومیک در بهبود وضعیت خاک، افزایش فعالیت زیستی میکروارگانیسم‌ها و در نهایت تقویت جذب عناصر غذایی مربوط باشد. در نتیجه، گیاه با توسعه بهتر ریشه و کارآمدتر شدن تغذیه، توان بیشتری برای رشد رویشی و پرشدن دانه‌ها پیدا می‌کند (Canellas & Olivares, 2014).

در مقابل، در شرایط تنش آبی (WS) اسید آمینه اثر مؤثرتری نسبت به سایر محرک‌ها نشان داد و در شاخص‌هایی مانند بهره‌وری آب یا حفظ عملکرد، عملکرد بهتری را رقم زد. اسیدهای آمینه می‌توانند در شرایط کم‌آبی نقش سازشی داشته باشند؛ از جمله کمک به تنظیم اسمزی، حمایت از ساختارهای پروتئینی و کاهش آثار تنش اکسیداتیو از طریق تقویت سیستم‌های دفاعی؛ بنابراین، در شرایط محدودکننده آب، محرک‌هایی که بیشتر به سازوکارهای بقا و تطابق گیاه مرتبط‌اند، اثربخشی بالاتری خواهند داشت (Khan et al., 2019b).

عصاره جلبک دریایی نیز به‌صورت کلی اثر مثبت نشان داد و این اثر در هر دو رژیم رطوبتی مشاهده شد، هرچند شدت آن بسته به شرایط محیطی متفاوت بود. عصاره جلبک دریایی حاوی ترکیبات زیست‌فعال مانند آلجینات‌ها و همچنین موادی با اثرات شبه‌هورمونی است که می‌تواند سبب تقویت فرایندهای تنظیم رشد، افزایش تقسیم سلولی و بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه شود. این محرک‌ها معمولاً توان گیاه را برای تحمل تنش افزایش داده و در نهایت منجر به حفظ نسبی عملکرد و بهبود بهره‌وری استفاده از آب می‌شوند (Craigie, 2011; Rouphael & Colla, 2020).

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که کاربرد زیست‌محرك‌های گیاهی می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی مؤثر، بخشی از آثار نامطلوب تنش آبی را در کلزا کاهش داده و پایداری تولید این محصول را در شرایط محدودیت منابع آب بهبود بخشد. در میان زیست‌محرك‌های مورد بررسی، اسید آمینه و اسید هیومیک بیشترین ظرفیت را برای ارتقای عملکرد، حفظ کیفیت محصول و افزایش بهره‌وری آب نشان دادند، هرچند میزان اثربخشی آن‌ها به شرایط رطوبتی حاکم بر مزرعه وابسته بود. نتایج تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره نیز بیانگر آن بود که ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های کمی و کیفی می‌تواند رویکردی مناسب برای انتخاب گزینه‌های مدیریتی در سامانه‌های زراعی تحت تنش باشد و نسبت به ارزیابی بر پایه یک شاخص منفرد، تصویری جامع‌تر از عملکرد تیمارها ارائه دهد. با توجه به افزایش محدودیت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک، استفاده از زیست‌محرك‌های گیاهی، به‌ویژه اسید آمینه، می‌تواند به‌عنوان بخشی از برنامه مدیریت تغذیه و آبیاری کلزا، نقش مؤثری در افزایش کارایی مصرف آب و پایداری تولید ایفا کند. همچنین، بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در کنار شاخص‌های متداول زراعی، ابزار مناسبی برای انتخاب تیمارهای برتر و تدوین راهبردهای مدیریتی در شرایط تنش فراهم می‌آورد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، علاوه بر ارزیابی شاخص‌های زراعی، اثر زیست‌محرك‌های گیاهی بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، از جمله ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، کارایی فتوسنتز، روابط آبی گیاه و فعالیت آنزیم‌های مرتبط با تحمل تنش، در سطوح مختلف تنش خشکی و شرایط اقلیمی متفاوت بررسی شود. همچنین ارزیابی اقتصادی کاربرد این ترکیبات و بررسی اثرات بلندمدت آن‌ها بر ویژگی‌های خاک و پایداری سامانه‌های تولید می‌تواند زمینه را برای ارائه توصیه‌های مدیریتی دقیق‌تر فراهم سازد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از مسئولان و کارکنان ایستگاه تحقیقات مغان به‌دلیل همکاری در اجرای این آزمایش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی یا غیرمالی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

References

1. Alloway, B. J. 2008. *Zinc in soils and crop nutrition* (2nd ed.). International Zinc Association.
2. Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026–2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>
3. Ashraf, M., & Harris, P. J. C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
4. Brady, N. C., & Weil, R. R. 2016. *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson.
5. Canellas, L. P., & Olivares, F. L. 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0011-1>
6. Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., & Piccolo, A. 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
7. Craigie, J. S. 2011. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23, 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
8. du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
9. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. 2014. Drought stress in plants: An overview. In R. Aroca (Ed.), *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features* (pp. 1–33). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
10. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
11. Garcia-Caparrós, P., Ciriello, M., Rouphael, Y., & Giordano, M. 2025. The role of organic extracts and inorganic compounds as alleviators of drought stress in plants. *Horticulturae*, 11(1), 91. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010091>
12. Gavelienė, V., & Jurkonienė, S. 2026. Biostimulants and their role in increasing cereal crops' resistance to drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 17, Article 1837848. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1837848>
13. Gee, G. W., & Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, Vol. 5, pp. 383–411.
14. Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. 2014. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8th ed.). Pearson.
15. Helmke, P. A., & Sparks, D. L. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Properties* (pp. 551–575). Madison: Soil Science Society of America.
16. Henderson, B. C. R., Sanderson, J. M., & Fowles, A. 2025. A review of the foliar application of individual amino acids as biostimulants in plants. *Discover Agriculture*, 3, 69. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00222-7>
17. Islamic Republic of Iran Meteorological Organization. n.d. *Meteorological data of Moghan station, Ardabil, Iran*. Tehran, Iran: Islamic Republic of Iran Meteorological Organization. (In Persian).
18. Khan, N., Bano, A., & Babar, M. A. 2019a. The stimulatory effects of plant growth promoting rhizobacteria and plant growth regulators on wheat physiology grown in sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(3), 345–358. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1494344>
19. Khan, N., Bano, A., & Babar, M. A. 2019b. Impacts of amino acids application on crop productivity and abiotic stress tolerance: A review. *Plant Growth Regulation*, 88(2), 153–168. <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00497-w>

20. Lakhawat, S. S., Sharma, V., Singh, T., Patil, P., Priyadevi, S., & Gutam, S. 2024. Effects of pan evaporation-based drip irrigation levels on performance of guava grown in Udaipur and Rewa regions of India. *Journal of Agrometeorology*, 26(1), 69–73.
<https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2306>
21. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87.
<https://doi.org/10.1038/nature16467>
22. Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
23. Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. 1996. Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods* (pp. 437–474). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
24. Ma, X., Kayoumu, M., Yin, Y., Wang, Z., & Duan, G. 2026. Review of amino acid foliar application as a stress mitigation strategy: Unraveling the protective mechanisms against abiotic stress. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 5, e70135.
<https://doi.org/10.1002/sae2.70135>
25. Marschner, P. 2012. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
26. Nelson, D. W., & Sommers, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods* (pp. 961–1010). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
27. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. 1982. Phosphorus. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 403–430). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
28. Opricovic, S., & Tzeng, G. H. 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
29. Passioura, J. B. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 176–196.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.012>
30. Rahbari, M., Psutka, J., Black, B., & Hesami, M. 2026. Biochemical insights into fulvic acid-driven drought tolerance in canola. *Plant Stress*, 19, 101210.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101210>
31. Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 167–179). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
32. Rouphael, Y., & Colla, G. 2020. Editorial: Biostimulants in Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
33. Shafik, S., Elshorbagy, A., & Maher, A. 2025. Multi-criteria optimization of water-energy-agriculture nexus using VIKOR approach. *Sustainable Cities and Society*, 103, 105312.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105312>
34. Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. 2019. Ascophyllum nodosum-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science*, 10, 655.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
35. Taha, A. A., Ibrahim, M. A. M., & Abdelkhalek, A. A. 2011. Irrigation scheduling for pea using evaporation pan under drip irrigation at North Nile Delta region. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2(2), 203–212.
<https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55426>
36. Taiz, L., & Zeiger, E. 2010. *Plant physiology and development* (5th ed.). Sinauer Associates.
37. Thomashow, M. F. 1999. Plant cold acclimation: Freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 571–599.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.571>
38. Wu, Z., Li, Y., Wang, R., Xu, X., Ren, D., Huang, Q., Xiong, Y., & Huang, G. 2023.

- Evaluation of irrigation water saving and salinity control practices of maize and sunflower in the upper Yellow River basin with an agro-hydrological model based method. *Agricultural Water Management*, 278, 108157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108157>
39. Yadav, M., Vashisht, B. B., Jalota, S. K., et al. 2024. Improving water efficiencies in rural agriculture for sustainability of water resources: A review. *Water Resources Management*, 38, 3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03836-6>
40. Zhang, S., Kang, Y., Gao, X., Chen, P., Cheng, X., Song, S., & Li, L. 2023. Optimal reservoir operation and risk analysis of agriculture water supply considering encounter uncertainty of precipitation in irrigation area and runoff from upstream. *Agricultural Water Management*, 277, 108091. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108091>
41. Zolfani, S. H., & Saparauskas, J. 2013. New application of SWARA method in prioritizing sustainability assessment indicators of energy system. *Engineering Economics*, 24(5), 408–414. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.24.5.4526>