Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research

(Soil and Water Sci.)

https:// srjournal.areeo.ir/

Optimization of Multi-Criteria Decision-Making Weights Using a Genetic Algorithm for Selecting the Best Management Treatment in Canola under Different Irrigation Management Practices and Growth Promoters

Reza Mohammadikia[a*] and Mohammad Pasandideh[a]

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

Article Info

Article Type
Research Article

Received
August 18, 2026
Revised
September 21, 2026
Accepted
October 07, 2026
Published online
November 16, 2026

Keywords
Grain yield
Irrigation management
Sustainable agriculture
Water productivity
Water stress

[*]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, particularly in arid and semi-arid regions, is affected by limited water resources. The application of biostimulants can be an effective approach to improving crop yield and enhancing plant tolerance to water stress. However, selecting the optimal combination of irrigation management and biostimulant type requires the simultaneous evaluation of multiple criteria, including seed yield, water productivity, and product quality. Therefore, the application of multi-criteria decision-making methods and optimization of criterion weights can contribute to more accurate and robust selection of management treatments.

Materials and Methods: Data for this study were derived from a field experiment in which two irrigation levels (normal and water stress) and five biostimulant levels (control, amino acid, humic acid, fulvic acid, and seaweed extract) were examined in a total of 10 treatments. Four evaluation criteria, water productivity (kg m^{-3}), seed oil percentage (%), water use (m^3 ha^{-1}), and seed yield (kg ha^{-1}) were included in the decision matrix. For comprehensive evaluation and validation of the previous finding, eight decision-making combinations were employed, formed by crossing two ranking algorithms TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) and VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) with four weighting methods (equal weighting, Shannon's entropy, CRITIC, and genetic algorithm). TOPSIS operates based on Euclidean distance from the ideal solution, while VIKOR is based on compromise and consensus logic. Genetic algorithm weights were optimized using NSGA-II to maximize the separation between the best and second-best alternatives. Robustness analysis was conducted from four perspectives: agreement on the best alternative, Spearman correlation for the overall ranking structure, separate ranking of stress and normal treatments, and independence from weighting philosophy and ranking algorithm.

Results: The results showed that all eight decision-making combinations, without exception, identified the WS × Amino acid treatment as the best option, a 100% agreement that is rare in the multi-criteria decision-making literature. The Spearman correlation coefficient with a mean of 0.904 confirmed very high agreement among the methods; indeed, six of the eight methods produced completely identical rankings (ρ = 1.0). Separate analysis of irrigation conditions revealed a clear pattern. Under water stress conditions, amino acid was the best stimulant, increasing seed yield by 23% (from 3002 to 3703 kg ha^{-1}) and water productivity by 28% (from 1.40 to 1.79 kg m^{-3}) compared to the control. It was followed by seaweed extract (+18%), humic acid (+14%), and fulvic acid (+14%). Under normal irrigation conditions, however, humic acid was superior, increasing seed yield by 14% (from 3369 to 3844 kg ha^{-1}) and achieving the highest oil content (43.9%), while amino

acid fell to fourth place. This condition-dependent ranking shift is one of the most important agronomic findings of this study. From a methodological perspective, GA-VIKOR achieved the highest discrimination power with a separation value of 0.222, approximately five times greater than VIKOR with equal weighting (0.044) and about six times greater than VIKOR with CRITIC weighting (0.038). GA-TOPSIS was the second-best method with 0.135. These results demonstrate that optimizing weights with a genetic algorithm, while preserving the final outcome, substantially increases decision-making confidence.

Conclusion: This study produced three main achievements: First, it proved the complete robustness of the previous study's finding, demonstrating that the superiority of WS × Amino acid is an inherent, method-independent phenomenon, not the result of choosing a specific analytical approach. Second, it provided conditional management recommendations: under water-limited conditions, amino acid is the best choice, while under full water availability, humic acid should be preferred. Third, it demonstrated the superiority of GA-VIKOR in enhancing discrimination power and decision-making confidence, thereby promoting the application of integrated GA-MCDM approaches in agricultural sciences. These findings have direct practical implications for farmers, water managers, and agricultural policymakers. The proposed framework can be extended to other crops, other climatic regions, and combined with multi-objective algorithms for future research.

Cite this article: Mohammadikia, R., Pasandideh, M., 2026. Optimization of Multi-Criteria Decision-Making Weights Using a Genetic Algorithm for Selecting the Best Management Treatment in Canola under Different Irrigation Management Practices and Growth Promoters. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (3), pp 445-464.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373973.833
Publisher: Soil Science Society of Iran

Publisher: Soil Science Society of Iran

نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

https:// srjournal.areeo.ir/

بهینه‌سازی وزن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهترین تیمار مدیریتی کلزا تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و محرک‌های رشد

رضا محمدی‌کیا[1]* و محمد پسندیده[1]

[1] مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵

واژه‌های کلیدی

بهره‌وری آب

تنش آبی

عملکرد دانه

کشاورزی پایدار

مدیریت آبیاری

***ایمیل نویسنده مسئول**

rmswri@gmail.com

چکیده

هدف از این پژوهش، توسعه و ارزیابی چارچوبی مبتنی بر بهینه‌سازی ژنتیکی وزن معیارها برای انتخاب بهترین ترکیب مدیریت آبیاری و محرک‌های رشد در کلزا بود. داده‌ها شامل ۱۰ تیمار حاصل از ترکیب دو سطح آبیاری و پنج سطح محرک زیستی بود. چهار معیار بهره‌وری آب، درصد روغن، آب مصرفی و عملکرد دانه با چهار روش وزن‌دهی یکسان، آنتروپی شانون، CRITIC و الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه مبتنی بر NSGA-II، وزن‌دهی و با دو روش TOPSIS و VIKOR رتبه‌بندی شدند. هشت ترکیب تصمیم‌گیری، مقایسه و پایداری نتایج با استفاده از توافق در انتخاب گزینه برتر و همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن ارزیابی شد. هر هشت ترکیب تصمیم‌گیری، بدون استثنا، تیمار تحت تنش آبی همراه با کاربرد اسید آمینه را به‌عنوان بهترین گزینه معرفی کردند. میانگین ضریب همبستگی اسپیرمن بین رتبه‌بندی‌ها برابر با ۰/۹۰۴ بود که بیانگر توافق بسیار بالای روش‌های رتبه‌بندی بود. بررسی تفکیکی شرایط آبیاری نشان داد که در شرایط تنش آبی، کاربرد اسید آمینه و در شرایط آبیاری نرمال، اسید هیومیک بهترین عملکرد را داشت. از نظر قدرت تفکیک، ترکیب وزن‌دهی الگوریتم ژنتیک با ویکور با مقدار جداسازی ۰/۲۲۲ بالاترین عملکرد را نشان داد که حدود پنج برابر بیشتر از VIKOR با وزن‌دهی یکسان (۰/۰۴۴) و حدود شش برابر بیشتر از VIKOR با وزن‌دهی CRITIC (۰/۰۳۸) بود. در مجموع، نتایج نشان داد که بهینه‌سازی وزن معیارها با الگوریتم ژنتیک، به‌ویژه در ترکیب با روش VIKOR، می‌تواند قدرت تفکیک گزینه‌ها را افزایش داده و چارچوب مؤثری برای تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب راهبردهای مدیریتی متناسب با شرایط آبیاری در کشت کلزا فراهم کند.

استناد: محمدی‌کیا، ر.، پسندیده، م.، ۱۴۰۵. بهینه‌سازی وزن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهترین تیمار مدیریتی کلزا تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و محرک‌های رشد. مقاله پژوهشی، *نشریه پژوهش‌های خاک*، (۳) ۴۰، ص ۴۴۵-۴۶۴.

DOI: https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.373973.833

مقدمه

کلزا (*Brassica napus L.*) یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی جهان است و نقش قابل‌توجهی در تأمین روغن و پروتئین مورد نیاز انسان و دام دارد. اهمیت اقتصادی این گیاه، همراه با دامنه وسیع کشت آن، موجب شده است که افزایش و پایداری تولید کلزا از اهداف مهم نظام‌های تولید کشاورزی باشد (Kaur et al., 2020; Przybylski et al., 2020). بااین‌حال، تولید پایدار کلزا در مناطق خشک و نیمه‌خشک با محدودیت منابع آب مواجه است. کمبود آب می‌تواند با کاهش رشد و عملکرد گیاه، تغییر در اجزای عملکرد و کاهش برخی ویژگی‌های کیفی دانه همراه باشد. این اثرات در مراحل زایشی، به‌ویژه از گلدهی تا تشکیل و پر شدن دانه، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند؛ به‌طوری‌که محدودیت آب در این دوره می‌تواند تعداد و وزن دانه و برخی صفات مرتبط با کیفیت دانه و روغن را تحت تأثیر قرار دهد (Champolivier & Merrien, 1996; Jensen et al., 1996).

علاوه بر میزان دسترسی به آب، افزایش تبخیر و خشک‌شدن خاک نیز می‌تواند بر رشد، عملکرد و ترکیب دانه کلزا اثرگذار باشد. مطالعات مزرعه‌ای نشان داده‌اند که شرایط محدودیت آب می‌تواند ویژگی‌هایی مانند مقدار روغن و پروتئین دانه و برخی پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه را تغییر دهد (Jensen et al., 1996). ازاین‌رو، مدیریت مناسب آبیاری، اگرچه یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش خسارت ناشی از تنش آبی است، به‌تنهایی ممکن است برای حفظ عملکرد و کیفیت محصول در شرایط محدودیت آب کافی نباشد. در این شرایط، استفاده از راهکارهایی که بتوانند پاسخ فیزیولوژیک گیاه به تنش را تعدیل کنند، مورد توجه قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر، محرک‌های زیستی به‌عنوان یکی از رویکردهای مورد توجه در مدیریت تولید گیاهان تحت شرایط نامطلوب محیطی مطرح شده‌اند. محرک‌های زیستی طیف متنوعی از مواد و میکروارگانیسم‌هایی را دربر می‌گیرند که با هدف افزایش کارایی تغذیه‌ای، بهبود تحمل به تنش‌های غیرزیستی و یا ارتقای ویژگی‌های کیفی محصول مورد استفاده قرار می‌گیرند، بدون آنکه اثر آن‌ها صرفاً به تأمین مستقیم عناصر غذایی محدود باشد (du Jardin, 2015). از گروه‌های مهم محرک‌های زیستی می‌توان به مواد هیومیکی و اسیدهای فولویک، هیدرولیزهای پروتئینی و اسیدهای آمینه و عصاره‌های جلبک دریایی اشاره کرد. این ترکیبات ممکن است از طریق اثرگذاری بر رشد ریشه، جذب و استفاده از عناصر غذایی، فرایندهای متابولیکی و سامانه‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی، پاسخ گیاه به شرایط نامطلوب محیطی را تعدیل کنند (Calvo et al., 2014; Rouphael & Colla, 2018).

شواهد تجربی نیز نشان داده‌اند که برخی محرک‌های زیستی می‌توانند پاسخ فیزیولوژیک کلزا به کمبود آب را تحت تأثیر قرار دهند. برای مثال، Lotfi و همکاران (۲۰۱۵) در کلزا نشان دادند که کاربرد اسید فولویک تحت شرایط محدودیت آب با بهبود برخی شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی همراه بود. همچنین، عصاره‌های جلبک دریایی به‌عنوان یکی از گروه‌های مهم محرک‌های زیستی، به دلیل دارا بودن ترکیبات زیست‌فعال مختلف، در مطالعات مرتبط با رشد و تحمل گیاهان به تنش‌های محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود این شواهد، پاسخ گیاه به محرک‌های زیستی لزوماً ثابت و مستقل از شرایط محیطی نیست و می‌تواند تحت تأثیر نوع محرک، شدت و زمان تنش، ژنوتیپ و وضعیت فیزیولوژیک گیاه قرار گیرد (du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2018). بنابراین، مقایسه مستقیم چند نوع محرک زیستی در سطوح متفاوت تنش آبی می‌تواند اطلاعات مناسب‌تری برای شناسایی تیمارهای مؤثر و تعیین شرایط کاربرد آن‌ها فراهم کند.

از سوی دیگر، انتخاب مناسب‌ترین ترکیب محرک زیستی و وضعیت آبیاری را نمی‌توان صرفاً بر اساس یک شاخص منفرد مانند عملکرد دانه انجام داد. یک تیمار ممکن است عملکرد بیشتری ایجاد کند، اما همزمان مصرف آب بالاتری داشته باشد؛ در مقابل، تیماری دیگر ممکن است بهره‌وری آب بیشتری ایجاد کند، اما از نظر عملکرد یا کیفیت دانه در سطح پایین‌تری قرار گیرد. بنابراین، انتخاب تیمار مناسب یک مسئله چندمعیاره است که در آن چندین معیار عملکردی، اقتصادی به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[۱] (MCDM) امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف و رتبه‌بندی گزینه‌های مدیریتی را فراهم می‌کنند (Behzadian et al., 2012).

در میان روش‌های تحلیل چندمعیاره، روش تاپسیس[۲] (TOPSIS) گزینه‌ها را بر اساس فاصله آن‌ها از راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل ارزیابی می‌کند و روش ویکور[۳] (VIKOR) بر شناسایی راه‌حل سازشی در حضور معیارهای متعارض تمرکز دارد. هر دو روش در مسائل مختلف تصمیم‌گیری و رتبه‌بندی گزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Opricovic & Tzeng,

---

[۱] Multi-Criteria Decision Making

[۲] Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

[۳] VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

2004; Behzadian et al., 2012). بااین‌حال، نتیجه حاصل از هر روش تحلیل چندمعیاره تا حد زیادی به وزن اختصاص‌یافته به معیارها وابسته است؛ ازاین‌رو، روش تعیین وزن معیارها می‌تواند بر رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها اثرگذار باشد.

وزن‌دهی یکسان، اگرچه ساده و شفاف است، تفاوت در میزان اطلاعات موجود در معیارهای مختلف را در نظر نمی‌گیرد. در مقابل، روش‌های عینی مانند آنتروپی شانون و کریتیک[۱] (CRITIC) می‌توانند وزن معیارها را بر اساس ویژگی‌های آماری داده‌ها تعیین کنند. روش کریتیک، برای مثال، وزن معیارها را با توجه هم‌زمان به میزان تضاد یا پراکندگی اطلاعات و همبستگی میان معیارها محاسبه می‌کند (Diakoulaki et al., 1995). بااین‌حال، این روش‌ها وزن معیارها را بر مبنای ساختار آماری داده‌ها تعیین می‌کنند و لزوماً وزن‌هایی را ارائه نمی‌دهند که بیشترین قدرت تفکیک میان گزینه‌های مورد ارزیابی را ایجاد کنند. این موضوع به‌ویژه زمانی اهمیت پیدا می‌کند که هدف، شناسایی و تفکیک گزینه‌های بسیار نزدیک به یکدیگر باشد.

در چنین شرایطی، می‌توان تعیین وزن معیارها را به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفت. در این رویکرد، الگوریتم ژنتیک[۲] (GA) می‌تواند برای جست‌وجوی ترکیب وزن‌هایی به کار رود که یک تابع هدف از پیش تعریف‌شده را بهینه کند. در چارچوب حاضر، وزن معیارها به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند و تابع برازش می‌تواند بر اساس میزان تفکیک‌پذیری گزینه‌ها تعریف شود. بدین ترتیب، به‌جای تحمیل یک مجموعه وزن از پیش تعیین‌شده، وزن‌ها بر اساس ساختار داده‌ها و هدف مشخص تحلیل بهینه می‌شوند.

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی وزن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، در چارچوبی تلفیقی از الگوریتم ژنتیک و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شد. هدف از این رویکرد، بررسی میزان پایداری رتبه‌بندی تیمارها در برابر تغییر روش تعیین وزن معیارها و الگوریتم رتبه‌بندی، ارزیابی قدرت تفکیک رویکردهای مختلف وزن‌دهی و مقایسه عملکرد دو روش رتبه‌بندی در شرایط مختلف وزن‌دهی بود. افزون بر این، چارچوب پیشنهادی امکان بررسی وابستگی انتخاب محرک زیستی مناسب به سطوح آبیاری را فراهم می‌کند و از این طریق می‌توان مشخص کرد که آیا یک تیمار زیستی می‌تواند بدون توجه به وضعیت آبیاری به‌عنوان گزینه برتر شناسایی شود یا انتخاب آن به شرایط تأمین آب وابسته است. در نهایت، این رویکرد می‌تواند زمینه‌ای برای ارائه توصیه‌های مدیریتی شرطی و مبتنی بر شرایط آبیاری در انتخاب محرک زیستی مناسب برای کشت کلزا فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش و عملیات زراعی

این پژوهش، طی دو فصل زراعی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مغان (استان اردبیل) در قالب کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل دو سطح آبیاری بود که در آن آبیاری نرمال[۳] (NI) پس از تجمع ۷۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A و تنش آبی[۴] (WS) پس از تجمع ۱۳۰ میلی‌متر تبخیر انجام گرفت. عامل فرعی نیز شامل پنج تیمار شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی بود که در دو مرحله خروج از روزت و آغاز گلدهی اعمال شدند. اسید آمینه، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی با غلظت ۵ در هزار به‌صورت محلول‌پاشی و اسید هیومیک به میزان ۵ کیلوگرم در هکتار از طریق کودآبیاری مصرف شد.

رقم کلزای دِلگان در نیمه دوم مهرماه کشت شد و برای تمامی تیمارها مدیریت تغذیه‌ای یکسانی اعمال گردید. در پایان فصل رشد، عملکرد دانه، درصد روغن، میزان آب مصرفی و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شد. آب آبیاری بر اساس رطوبت حجمی خاک در ناحیه ریشه و با استفاده از دستگاه TDR تعیین و به‌گونه‌ای تنظیم شد که رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی تأمین شود. بهره‌وری آب نیز از نسبت عملکرد دانه به کل آب مصرفی محاسبه گردید.

ترکیب تصمیم‌گیری و ماتریس تصمیم

به‌منظور ارزیابی هم‌زمان عملکرد ترکیب‌های مختلف آبیاری و محرک‌های زیستی، از چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. در این چارچوب، ۱۰ تیمار ترکیبی از دو سطح آبیاری و پنج سطح از محرک‌های زیستی، با استفاده از هشت ترکیب تصمیم‌گیری حاصل از تلاقی چهار روش وزن‌دهی یکسان، آنتروپی شانون، کریتیک و الگوریتم ژنتیک و دو الگوریتم رتبه‌بندی تاپسیس و ویکور به‌کار گرفته شد (جدول ۱).

---

[۱] CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation
[۲] Genetic Algorithm
[۳] Normal Irrigation
[۴] Water stress

جدول ۱- هشت ترکیب تصمیم‌گیری مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Eight Decision-Making Combinations Used in This Study

کد ترکیب / Combination	روش وزن‌دهی / Weighting Method	الگوریتم / Algorithm
V-Eq	وزن یکسان Equal Weight	VIKOR ویکور
V-En	آنتروپی شانون Shannon Entropy	VIKOR ویکور
V-CRITIC	کریتیک CRITIC	VIKOR ویکور
V-GA	الگوریتم ژنتیک Genetic Algorithm	VIKOR ویکور
T-Eq	وزن یکسان Equal Weight	TOPSIS تاپسیس
T-En	آنتروپی شانون Shannon Entropy	TOPSIS تاپسیس
T-CRITIC	کریتیک CRITIC	TOPSIS تاپسیس
T-GA	الگوریتم ژنتیک Genetic Algorithm	TOPSIS تاپسیس

بر اساس ترکیب سطوح آبیاری و محرک‌های زیستی، ماتریس تصمیم نهایی با ۱۰ تیمار و چهار معیار ارزیابی (جدول ۲) تشکیل شد که ابعاد مختلف عملکرد تولیدی، کیفیت محصول و مصرف آب را پوشش می‌دهند. این معیارها شامل بهره‌وری آب، به‌عنوان نسبت عملکرد دانه به آب مصرفی؛ درصد روغن دانه به‌عنوان مهم‌ترین شاخص کیفی محصول؛ آب مصرفی و عملکرد دانه بودند. در فرآیند ارزیابی، بهره‌وری آب، درصد روغن دانه و عملکرد دانه به‌عنوان معیارهای سود و آب مصرفی به‌عنوان معیار هزینه در نظر گرفته شدند .

جدول ۲- ماتریس تصمیم‌گیری ارزیابی تیمارهای کلزا

Table 2. Decision Matrix for the Evaluation of Rapeseed Treatments

کد Code	تیمار Treatment	بهره‌وری آب Water Productivity ($Kg\ m^{-3}$) (+)	درصد روغن Oil Content (%) (+)	آب مصرفی Water Use ($M^3\ ha^{-1}$) (−)	عملکرد دانه Seed Yield ($Kg\ ha^{-1}$) (+)
T1	نرمال × شاهد (NI × Control)	1.04	40.6	3239.42	3369
T2	نرمال × اسید آمینه (NI × Amino acid)	1.07	42.8	3272.90	3502
T3	نرمال × اسید هیومیک (NI × Humic acid)	1.19	43.9	3230.25	3844
T4	نرمال × اسید فولویک (NI × Fulvic acid)	1.11	41.4	3224.32	3579
T5	نرمال × جلبک دریایی (NI × Seaweed extract)	1.10	42.8	3244.55	3569
T6	تنش آبی × شاهد (WS × Control)	1.40	36.7	2144.29	3002
T7	تنش آبی × اسید آمینه (WS × Amino acid)	1.79	41.1	2068.72	3703
T8	تنش آبی × اسید هیومیک (WS × Humic acid)	1.63	41.2	2099.39	3422
T9	تنش آبی × اسید فولویک (WS × Fulvic acid)	1.63	39.5	2092.64	3411
T10	تنش آبی × جلبک دریایی (WS × Seaweed extract)	1.69	41.3	2097.04	3544

NI: آبیاری نرمال، WS: تنش آبی

علامت(+) : معیار سود (هرچه مقدار بیشتر باشد، مطلوب‌تر است)

علامت(−) : معیار هزینه (هرچه مقدار کمتر باشد، مطلوب‌تر است)

NI: Normal irrigation; WS: Water stress

(+): Benefit criterion (the higher the value, the more desirable it is)

(−): Cost criterion (the lower the value, the more desirable it is)

روش‌های وزن‌دهی معیارها

وزن‌دهی یکسان

در روش وزن‌دهی یکسان (Equal Weighting)، بدون اعمال هیچ‌گونه پیش‌فرض یا قضاوت کارشناسی درباره اهمیت نسبی معیارها، وزن یکسانی به تمامی معیارها اختصاص داده می‌شود. به این معنا که اگر n معیار در مسئله وجود داشته باشد، وزن هر معیار برابر با 1/n خواهد بود. این روش ساده‌ترین و شفاف‌ترین رویکرد وزن‌دهی است و زمانی به‌کار می‌رود که یا اطلاعات کافی برای تعیین اهمیت نسبی معیارها در دسترس نیست، یا اساساً فرض بر آن است که همه معیارها از اهمیت یکسانی برخوردارند. از مزایای آن می‌توان به سادگی، بی‌طرفی، عدم نیاز به نظرسنجی از خبرگان و قابلیت تکرارپذیری بالا اشاره کرد؛ در مقابل، انتقاد اصلی وارد بر آن نادیده گرفتن تفاوت‌های واقعی در اهمیت معیارهاست که می‌تواند به نتایج غیرواقعی منجر شود. این روش اغلب به‌عنوان مبنای مقایسه برای ارزیابی اثر تغییر وزن‌ها در سایر روش‌های وزن‌دهی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

وزن‌دهی آنتروپی شانون

روش آنتروپی شانون یکی از روش‌های وزن‌دهی عینی[۱] در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که مبنای نظری آن بر مفهوم آنتروپی اطلاعات ارائه‌شده توسط شانون استوار است. در این روش، وزن معیارها بدون اتکا به قضاوت یا ترجیحات تصمیم‌گیرنده و بر اساس میزان اطلاعات موجود در داده‌های هر معیار تعیین می‌شود. به‌طور کلی، معیاری که در بین گزینه‌ها تغییرپذیری و قدرت تفکیک بیشتری داشته باشد، اطلاعات متمایزکننده بیشتری فراهم کرده و در نتیجه وزن بیشتری دریافت می‌کند؛ در مقابل، معیارهایی که مقادیر آن‌ها بین گزینه‌ها یکنواخت‌تر باشد، اطلاعات تفکیک‌کننده کمتری داشته و وزن پایین‌تری به خود اختصاص می‌دهند (Shannon, 1948; Wang & Lee, 2009). مراحل اجرای این روش شامل تشکیل ماتریس تصمیم، نرمال‌سازی داده‌ها، محاسبه آنتروپی هر معیار، تعیین درجه انحراف و در نهایت محاسبه وزن نهایی معیارها است.

وزن‌دهی کریتیک

روش کریتیک یکی از روش‌های عینی وزن‌دهی معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره است (Diakoulaki et al., 1995). در این روش، وزن هر معیار بر اساس دو ویژگی میزان پراکندگی اطلاعات در آن معیار و میزان تضاد یا همبستگی آن با سایر معیارها تعیین می‌شود. ابتدا ماتریس تصمیم نرمال‌سازی شده و سپس برای هر معیار، مقدار اطلاعات آن با درنظرگرفتن انحراف معیار و همبستگی میان معیارها محاسبه می‌شود. معیاری که تغییرپذیری بیشتری داشته باشد و اطلاعات متمایزتری نسبت به سایر معیارها ارائه کند، از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و وزن بالاتری دریافت می‌کند. در نهایت، با نرمال‌سازی مقادیر اطلاعاتی، وزن نهایی هر معیار به دست می‌آید. بنابراین، برخلاف روش‌های ذهنی وزن‌دهی، کریتیک وزن معیارها را بر اساس ساختار و اطلاعات موجود در خود داده‌ها تعیین می‌کند.

بهینه‌سازی وزن‌ها با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری مبتنی بر اصول انتخاب طبیعی و تکامل زیستی است که برای جست‌وجوی فضای راه‌حل و یافتن پاسخ‌های مناسب برای مسائل پیچیده به کار می‌رود (Holland, 1975; Goldberg, 1989). در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک به‌منظور تعیین وزن بهینه معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که وزن‌های معیارها به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده و الگوریتم با جست‌وجوی فضای مجاز وزن‌ها، ترکیبی از وزن‌ها را شناسایی می‌کند که بهترین مقدار تابع هدف تعریف‌شده را ایجاد کند.

در این رویکرد، هر مجموعه از وزن‌های معیارها به‌صورت یک کروموزوم یا راه‌حل کاندید نمایش داده شده و مجموعه‌ای از این کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه الگوریتم را تشکیل می‌دهد. سپس، کیفیت هر کروموزوم بر اساس مقدار تابع برازندگی[۲] ارزیابی می‌شود و کروموزوم‌های مناسب‌تر احتمال بیشتری برای انتخاب و تولید نسل بعدی خواهند داشت. در ادامه، با استفاده از عملگرهای اصلی الگوریتم ژنتیک شامل انتخاب (Selection)، تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation)، نسل‌های جدیدی از راه‌حل‌ها تولید می‌شوند. این فرایند به‌صورت تکراری ادامه می‌یابد تا معیار توقف از پیش تعیین‌شده، مانند رسیدن به تعداد مشخصی از نسل‌ها یا عدم بهبود قابل‌توجه تابع هدف، برآورده شود. در نهایت، کروموزومی که بهترین مقدار تابع هدف را در میان راه‌حل‌های بررسی‌شده ایجاد کند، به‌عنوان مجموعه وزن بهینه انتخاب می‌شود (Holland, 1975; Goldberg, 1989).

---

۱ Objective Weighting

۲ Fitness Function

الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه

از آنجا که مسئله بهینه‌سازی وزن‌ها در هر دو رویکرد تاپسیس و ویکور دارای یک تابع هدف واحد است، از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه استفاده شد. توابع برازش برای هر دو روش تاپسیس و ویکور به‌صورت زیر تعریف گردید.

$$F=CC_1 - CC_2 \quad (۵)$$

$$F=Q_2-Q_1 \quad (۶)$$

در روش تاپسیس، CC_1 و CC_2 به‌ترتیب نشان‌دهنده ضریب نزدیکی گزینه اول و دوم هستند که بر اساس مقدار ضریب نزدیکی مرتب شده‌اند. در روش ویکور، Q_1 و Q_2 به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار شاخص ویکور برای گزینه اول و دوم هستند که با توجه به ماهیت شاخص ویکور، گزینه دارای مقدار Q کمتر در رتبه بهتر قرار می‌گیرد. بنابراین، اختلاف میان شاخص‌های دو گزینه برتر به‌عنوان معیار قدرت تفکیک در نظر گرفته می‌شود. قید مجموع وزن‌ها برابر یک در هر دو رویکرد با نرمال‌سازی وزن‌ها پس از اعمال عملگرهای تقاطع و جهش در هر نسل اعمال شد؛ به‌گونه‌ای که مجموع وزن‌های چهار معیار در همه راه‌حل‌های کاندید همواره برابر یک باقی بماند.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک (جدول ۳) با تکیه بر مبانی و توصیه‌های ارائه‌شده در منابع کلاسیک و معتبر الگوریتم‌های ژنتیک، به‌ویژه Goldberg (۱۹۸۹) و Deb و همکاران (Deb et al., 2002) انتخاب شدند. پایداری نتایج با اجرای الگوریتم با ۱۰ عدد تصادفی مختلف بررسی شد.

جدول ۳- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

Table 3. Genetic Algorithm Parameters

پارامتر Parameter	الگوریتم Algorithm	متغیرها Variables	بازه وزن‌ها Weight Range	اندازه جمعیت Population Size	تعداد نسل‌ها Number of Generations	تقاطع Crossover	جهش Mutation
Value	GA	4 weights	[0.01, 1]	100	200	SBX (0.9)	Polynomial (0.1)

روش‌های رتبه‌بندی تیمارها

روش تاپسیس

روش تاپسیس یکی از روش‌های شناخته‌شده در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط هووانگ و یون (Hwang and Yoon, 1981) معرفی شد. اساس این روش بر این فرض استوار است که مناسب‌ترین گزینه، گزینه‌ای است که در یک فضای چندمعیاره، بیشترین شباهت را به راه‌حل ایده‌آل داشته باشد. به بیان دیگر، گزینه مطلوب باید به راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^+) نزدیک‌تر و هم‌زمان از راه‌حل ایده‌آل منفی (A^-) دورتر باشد. راه‌حل ایده‌آل مثبت مجموعه‌ای از بهترین مقادیر هر یک از معیارها و راه‌حل ایده‌آل منفی مجموعه‌ای از نامطلوب‌ترین مقادیر معیارها را در بر می‌گیرد.

در این روش، ابتدا ماتریس تصمیم (جدول ۲) که دارای واحدها و مقیاس‌های متفاوتی بودند، با استفاده از نرمال‌سازی برداری به مقیاسی قابل مقایسه تبدیل شدند. سپس با اعمال وزن‌های به‌دست‌آمده برای معیارها، ماتریس تصمیم نرمال‌شده وزن‌دهی شده تشکیل شد. این مرحله باعث شد میزان اهمیت نسبی هر معیار در فرآیند رتبه‌بندی لحاظ شود.

در ادامه، راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی بر اساس نوع معیارها تعیین گردید. برای معیارهای سود، مقدار بیشتر نشان‌دهنده عملکرد مطلوب‌تر بود، بنابراین بیشترین مقدار به‌عنوان مقدار ایده‌آل مثبت و کمترین مقدار به‌عنوان مقدار ایده‌آل منفی در نظر گرفته شد. در مقابل، برای معیارهای هزینه، کمترین مقدار مطلوب بوده و به‌عنوان مقدار ایده‌آل مثبت انتخاب شد؛ در حالی که بیشترین مقدار در مجموعه ایده‌آل منفی قرار گرفت.

پس از تعیین دو راه‌حل ایده‌آل، فاصله اقلیدسی هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه شد. این فواصل به‌ترتیب با (Di^+) و (Di^-) نشان داده می‌شوند. در نهایت، برای هر گزینه ضریب نزدیکی نسبی یا ضریب نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل[۱] (CC) مطابق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (۱)$$

مقدار (CCi) معمولاً در بازه صفر تا یک قرار دارد. هرچه مقدار این ضریب بزرگ‌تر باشد، گزینه موردنظر به راه‌حل ایده‌آل مثبت نزدیک‌تر و از راه‌حل ایده‌آل منفی دورتر است؛ بنابراین عملکرد مطلوب‌تری دارد و رتبه بالاتری به آن اختصاص می‌یابد. در نتیجه، گزینه‌ای که بیشترین مقدار (CCi) را داشته باشد، به‌عنوان گزینه برتر در میان گزینه‌های مورد بررسی انتخاب می‌شود (Behzadian et al., 2012).

روش ویکور

روش ویکور که توسط اپریکوویک (Opricovic, 1998) توسعه یافت، بر پایه منطق توافق و سازش طراحی شده است. برخلاف تاپسیس که صرفاً فاصله هندسی را ملاک قرار

[۱] Closeness Coefficient

می‌دهد، ویکور به‌دنبال یافتن گزینه‌ای است که از منظر سودمندی گروهی (S) و حداقل تأسف فردی (R) به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر باشد (Opricovic and Tzeng, 2004).

شاخص نهایی ویکور (Q) از ترکیب این دو معیار با پارامتر استراتژی v محاسبه می‌شود:

در ابتدا، بهترین و بدترین مقدار هر معیار تعیین شد. سپس شاخص مطلوبیت گروهی (S_i) و شاخص بیشترین پشیمانی (R_i) (برای هر گزینه از روابط زیر محاسبه شدند:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (۲)$$

$$R_i = MAX_j \left[w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (۳)$$

که در آن w_j وزن معیار j، x_{ij} عملکرد گزینه i در معیار j، f_j^* بهترین مقدار و f_j^- بدترین مقدار معیار است.

در ادامه، شاخص نهایی ویکور (Qi) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Q_i = v\left(\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}\right) + (1-v)\left(\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}\right) \quad (۴)$$

S^* و R^* به‌ترتیب کمترین مقادیر شاخص‌های S و R و S^- و R^- بیشترین مقادیر شاخص‌های Sو R هستند. در این پژوهش، مقدار پارامتر v برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد تا اهمیت یکسانی به مطلوبیت گروهی و حداقل پشیمانی فردی اختصاص یابد. در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مقادیر شاخص Q رتبه‌بندی شدند؛ به‌طوری‌که گزینه با کمترین مقدار Q به‌عنوان راه‌حل سازشی انتخاب گردید.

پس از محاسبه شاخص Q، دو شرط استاندارد ویکور بررسی شد. شرط اول (مزیت قابل قبول) بیان می‌کند که اختلاف Q بین گزینه اول و دوم باید بیشتر از نسبت یک به (m-1) باشد که با ۱۰ گزینه (m=۱۰) برابر ۰/۱۱۱ است. شرط دوم (پایداری قابل قبول) بیان می‌کند که گزینه اول باید در رتبه‌بندی S و R نیز بهترین باشد.

رتبه‌بندی ترکیبی و جداگانه تیمارهای تنش و نرمال

علاوه بر رتبه‌بندی هم‌زمان تمامی ۱۰ تیمار، به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد محرک‌های زیستی در شرایط مختلف آبیاری، تحلیل رتبه‌بندی به‌صورت جداگانه برای دو گروه آبیاری نیز انجام شد. گروه نخست شامل پنج تیمار تحت آبیاری نرمال (T1 تا T5) و گروه دوم شامل پنج تیمار تحت تنش آبی (T6 تا T10) بود. در هر یک از این دو زیرمجموعه، رتبه‌بندی تیمارها به‌طور مستقل و با استفاده از هر یک از هشت ترکیب روش‌های وزن‌دهی و رتبه‌بندی انجام گرفت. این تحلیل امکان شناسایی محرک زیستی برتر را به‌صورت مستقل در هر شرایط آبیاری فراهم نمود و به بررسی پایداری رتبه‌بندی تیمارها در شرایط متفاوت تأمین آب کمک کرد.

شاخص قدرت تفکیک

برای مقایسه کمی توانایی هشت ترکیب حاصل از روش‌های مختلف وزن‌دهی و رتبه‌بندی در تفکیک گزینه‌های برتر، شاخص قدرت تفکیک[۱] محاسبه شد. این شاخص بیانگر میزان فاصله گزینه دارای رتبه اول از گزینه دارای رتبه دوم است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، نشان‌دهنده توانایی بالاتر روش در ایجاد تمایز میان گزینه‌های برتر خواهد بود. در روش تاپسیس، با توجه به اینکه مقدار بالاتر ضریب نزدیکی (CC) بیانگر مطلوبیت بیشتر گزینه است، شاخص قدرت تفکیک از اختلاف بین ضرایب نزدیکی دو گزینه اول مطابق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Separation} = CC_1 - CC_2 \quad (۵)$$

که در آن CC_1 و CC_2 به‌ترتیب ضریب نزدیکی گزینه‌های رتبه اول و دوم در تاپسیس است.

در روش ویکور، اختلاف دو گزینه برتر بر اساس رابطه زیر به دست آمد:

$$\text{Separation} = Q_1 - Q_2 \quad (۶)$$

Q_1 و Q_2 مقادیر عدد ویکور برای دو گزینه برتر هستند. بنابراین، مقدار بالاتر شاخص قدرت تفکیک نشان‌دهنده فاصله بیشتر گزینه اول از گزینه دوم و در نتیجه قدرت تفکیک بالاتر روش موردنظر در شناسایی گزینه مطلوب است. از این شاخص به‌عنوان یک معیار کمی و قابل مقایسه برای ارزیابی و مقایسه عملکرد هشت ترکیب مختلف روش‌های وزن‌دهی و رتبه‌بندی استفاده شد.

تحلیل پایداری رتبه‌بندی

به‌منظور ارزیابی میزان پایداری نتایج در برابر تغییر روش وزن‌دهی و الگوریتم رتبه‌بندی، تحلیل پایداری از چهار جنبه انجام شد.

---

۱ Separation Index

نخست، توافق در گزینه برتر بررسی گردید؛ به این صورت که مشخص شد آیا هر ۸ ترکیب تصمیم‌گیری، تیمار یکسانی را به‌عنوان بهترین گزینه معرفی می‌کنند یا خیر.

دوم، توافق در کل ساختار رتبه‌بندی با استفاده از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (Siegel and Castellan, 1988)برای تمام ۲۸ جفت ممکن از ۸ روش محاسبه گردید. این ضریب میزان هم‌خوانی بین رتبه‌بندی‌های حاصل از روش‌های مختلف را کمّی می‌کند و مقادیر نزدیک به ۱ بیانگر توافق کامل هستند.

سوم، پایداری در زیرمجموعه‌ها بررسی شد؛ بدین صورت که رتبه‌بندی تیمارهای تنش آبی (WS) و آبیاری نرمال(NI)به‌صورت جداگانه و مستقل در هر ۸ روش تکرار گردید تا مشخص شود آیا انتخاب بهترین محرک در هر شرایط آبیاری نیز پایدار است.

چهارم، استقلال از فلسفه وزن‌دهی و الگوریتم رتبه‌بندی ارزیابی شد؛ به این معنا که آیا تغییر از وزن‌دهی مبنا (یکسان) به عینی (آنتروپی و کریتیک) و سپس به الگوریتم ژنتیک و نیز تغییر از تاپسیس به ویکور، نتیجه نهایی را تغییر می‌دهد یا خیر.

علاوه بر این، سه تحلیل تکمیلی برای ارزیابی دقیق‌تر پایداری انجام شد. بررسی استقلال معیارها با محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین بهره‌وری آب، عملکرد دانه و مصرف آب و همچنین تحلیل حساسیت با حذف بهره‌وری آب از مجموعه معیارها انجام شد تا مشخص شود آیا نتیجه نهایی به حضور این معیار وابسته است یا خیر. تحلیل حساسیت وزن‌ها با تغییر وزن هر معیار در دامنه ۵۰٪± حول مقدار اولیه و محاسبه رتبه‌بندی در ۱۰۰۰ تکرار مونت‌کارلو انجام شد؛ در هر تکرار، وزن‌ها به‌صورت تصادفی حول مقدار اولیه تغییر داده شدند و مجموع آن‌ها برابر یک نرمال‌سازی شد. بررسی پارتو[1] (غالب بودن گزینه‌ها) به‌منظور تعیین اینکه آیا گزینه منتخب در هیچ معیاری بدترین نیست و در حداقل یک معیار بهترین است، انجام شد؛ برای این منظور، هر گزینه با سایر گزینه‌ها مقایسه شد و وضعیت غالب یا مغلوب بودن آن تعیین گردید.

پیاده‌سازی نرم‌افزاری

تمامی محاسبات، شامل تشکیل ماتریس تصمیم، وزن‌دهی معیارها، اجرای روش‌های تاپسیس و ویکور، بهینه‌سازی وزن‌ها با الگوریتم ژنتیک، محاسبه شاخص قدرت تفکیک و رتبه‌بندی نهایی تیمارها، در محیط Python 3.10 انجام شد. برای پردازش داده‌ها و محاسبات عددی از کتابخانه‌های Pandas و NumPy و برای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی از کتابخانه Platypus استفاده شد.

نتایج

وزن معیارها تحت روش‌های مختلف وزن‌دهی

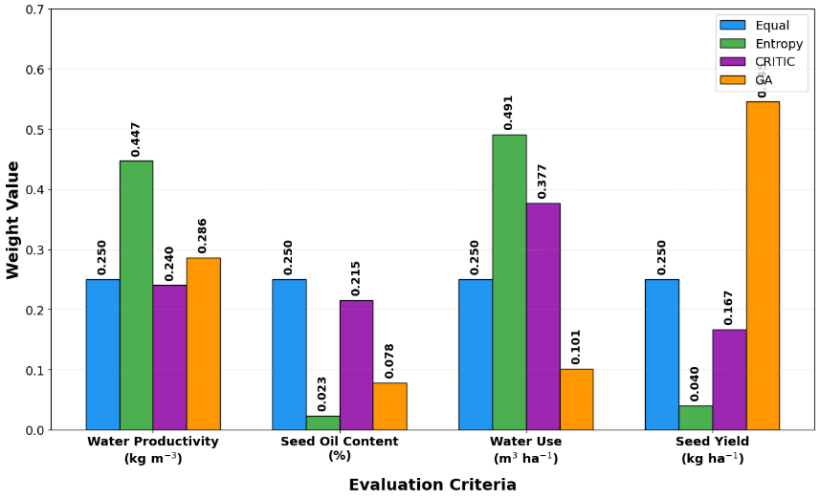
چهار روش وزن‌دهی تفاوت‌های قابل‌توجهی در اهمیت نسبی معیارها نشان دادند (شکل ۱). در روش وزن‌دهی یکسان، هر چهار معیار وزن برابر ۰/۲۵ دریافت کردند و هیچ‌کدام بر دیگری ترجیح داده نشد. این رویکرد ساده، مبنایی برای مقایسه سایر روش‌ها فراهم نمود.

بر اساس روش آنتروپی، بیشترین وزن به آب مصرفی (۰/۴۹۱) اختصاص یافت، در حالی که وزن محتوای روغن دانه (۰/۰۲۳) بسیار پایین بود. این نتیجه نشان می‌دهد که از دیدگاه روش آنتروپی، اطلاعات و پراکندگی موجود در داده‌های مصرف آب بیشترین نقش را در تمایز بین گزینه‌ها داشته است، در حالی که محتوای روغن دانه قدرت تمایزبخشی بسیار کمتری داشته است. همچنین، وزن بهره‌وری آب ۰/۴۴۷ نشان‌دهنده اهمیت بالای این معیار در این روش است.

در روش کریتیک نیز بیشترین وزن به آب مصرفی (۰/۳۷۷) اختصاص یافت و پس از آن بهره‌وری آب (۰/۲۴) و محتوای روغن دانه (۰/۲۱۵) قرار گرفتند. کمترین وزن مربوط به عملکرد دانه (۰/۱۶۷) بود. بنابراین، برخلاف روش آنتروپی که اختلاف بسیار شدیدی بین معیارها ایجاد کرده است، روش کریتیک توزیع متعادل‌تری از اهمیت معیارها ارائه می‌دهد. این تفاوت می‌تواند ناشی از آن باشد که کریتیک علاوه بر میزان پراکندگی هر معیار، همبستگی بین معیارها را نیز در تعیین وزن در نظر می‌گیرد.

در روش الگوریتم ژنتیک، الگوی وزن‌دهی کاملاً متفاوت بود؛ به‌طوری‌که عملکرد دانه با وزن ۰/۵۴۵ مهم‌ترین معیار شناخته شد و پس از آن بهره‌وری آب با وزن ۰/۲۸۶ قرار گرفت. در مقابل، وزن آب مصرفی تنها ۰/۱۰۱ و وزن محتوای روغن دانه ۰/۰۷۸ بود. بنابراین، روش الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش‌های آنتروپی و کریتیک، تأکید بسیار بیشتری بر عملکرد دانه دارد. این موضوع نشان می‌دهد که وزن‌دهی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، در چارچوب تابع هدف و ساختار بهینه‌سازی مورد استفاده، عملکرد دانه را به‌عنوان معیار غالب در فرآیند تصمیم‌گیری شناسایی کرده است.

[1] Pareto



شکل ۱- مقایسه وزن معیارها تحت روش‌های مختلف وزن‌دهی

Figure 1. Comparison of criteria weights under different weighting methods

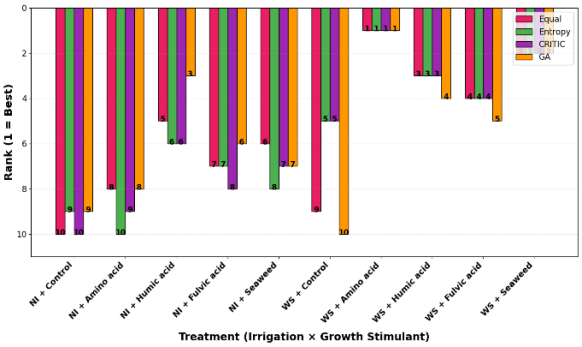
نتایج این بخش نشان داد که انتخاب روش وزن‌دهی می‌تواند ساختار اهمیت معیارها و در نتیجه نتایج نهایی رتبه‌بندی گزینه‌ها را به‌طور محسوسی تغییر دهد. در این مطالعه، آنتروپی و کریتیک بیشترین اهمیت را به معیارهای مرتبط با آب مصرفی و بهره‌وری آب اختصاص دادند، در حالی که الگوریتم ژنتیک به‌طور مشخص عملکرد دانه را معیار غالب قرار داد. بنابراین، استفاده از یک روش وزن‌دهی واحد بدون بررسی حساسیت نتایج می‌تواند به برداشت متفاوتی از برتری گزینه‌ها منجر شود. از این منظر، مقایسه چند روش وزن‌دهی و بررسی پایداری رتبه‌بندی حاصل، می‌تواند اعتبار تصمیم‌گیری چندمعیاره را افزایش دهد.

رتبه‌بندی تیمارهای ترکیبی

رتبه‌بندی ۱۰ تیمار تحت هشت ترکیب حاصل از چهار روش وزن‌دهی و دو الگوریتم رتبه‌بندی در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در هر هشت ترکیب، ترکیب تیمار تنش آبی با اسید آمینه (WS × Amino acid) بدون استثنا به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد؛ موضوعی که بیانگر پایداری بالای این تیمار در برابر تغییر روش وزن‌دهی و الگوریتم رتبه‌بندی است. مقادیر شاخص‌های S، R و Q برای این تیمار نیز جایگاه مطلوب آن را در چارچوب ویکور تأیید کرد. در روش وزن‌دهی مساوی، مقادیر S، R و Q به‌ترتیب ۰/۱۳۹۱، ۰/۰۹۷۲ و ۰/۰۲۱۷ بودند. این مقادیر در روش آنتروپی به‌ترتیب ۰/۰۱۵۶، ۰/۰۰۸۹ و ۰/۰۰۰۱ در روش کریتیک برابر با ۰/۱۱۱۶، ۰/۰۸۳۶ و ۰/۰۰۹۹ و در روش الگوریتم ژنتیک برابر با ۰/۱۱۴۱، ۰/۰۸۵۷ و ۰/۰۰۰۱ به‌دست آمدند. مقدار پایین Q در تمام روش‌های وزن‌دهی نشان‌دهنده نزدیکی این تیمار به راه‌حل ایده‌آل در چارچوب ویکور است.

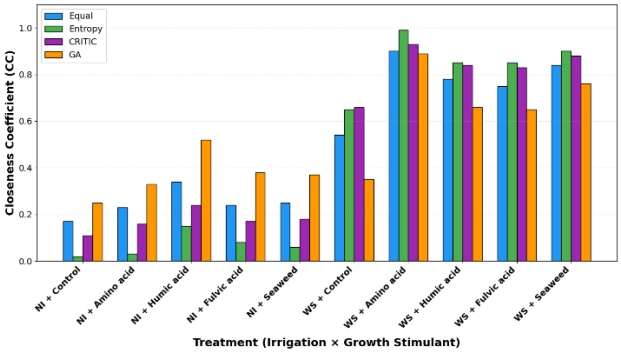
پس از این تیمار، تیمار جلبک دریایی با تنش آبی (WS × Seaweed) در هر چهار روش رتبه دوم را به‌طور پایدار حفظ کرد و تیمار اسید هیومیک با تنش آبی (WS × Humic acid) نیز در سه روش رتبه سوم را به خود اختصاص داد. نکته قابل‌توجه در روش GA-VIKOR آن است که تیمار اسید هیومیک با آبیاری نرمال (NI × Humic acid) به رتبه سوم صعود کرد و تیمار اسید هیومیک با تنش آبی (WS × Humic acid) به رتبه چهارم نزول یافت. این جابه‌جایی، تنها تغییر قابل‌توجه در رتبه‌های میانی بود و نشان‌دهنده حساسیت مکانیسم ویکور به وزن‌های بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک است.

در انتهای جدول، تیمار شاهد با آبیاری نرمال (NI × Control) در سه روش وزن‌دهی (یکسان، آنتروپی و کریتیک) بدترین رتبه (۱۰) را داشت و در روش الگوریتم ژنتیک نیز رتبه نهم را کسب کرد. این نتیجه تأیید می‌کند که آبیاری نرمال بدون استفاده از محرک زیستی، از منظر تلفیقی معیارهای تولید، کیفیت و مصرف آب، کم‌ترین مطلوبیت را دارد.



شکل ۲- رتبه‌بندی تیمارها با روش VIKOR تحت چهار روش وزن‌دهی

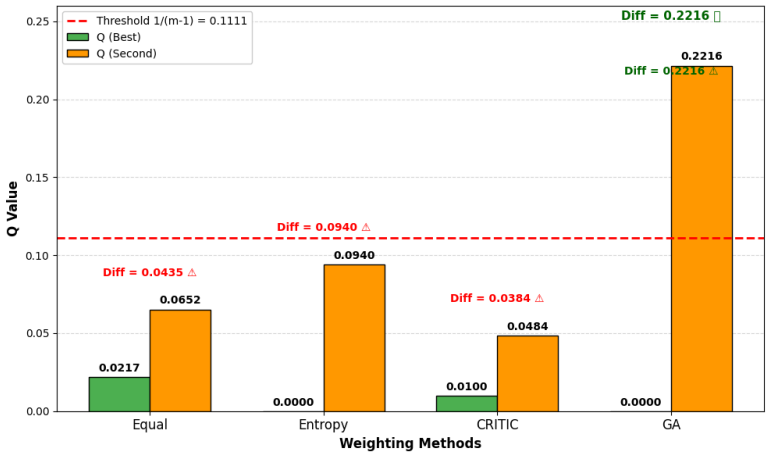
Figure 2. Ranking of treatments using VIKOR under four weighting methods



شکل ۳- مقایسه ضرایب نزدیکی (CC) روش TOPSIS تحت چهار روش وزن‌دهی

Figure 3. Comparison of closeness coefficients (CC) of TOPSIS under four weighting methods

مقادیر Q نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین تیمارهای تنش و نرمال است. در حالی که چهار تیمار برتر همگی از شرایط تنش آبی بودند، تیمارهای آبیاری نرمال به‌جز تیمار اسید هیومیک (NI × Humic acid) در روش الگوریتم ژنتیک نیمه پایینی جدول قرار گرفتند. این الگو حاکی از آن است که ترکیب کم‌آبیاری با محرک زیستی مناسب، به‌مراتب کارآمدتر از آبیاری کامل بدون محرک است. نتایج حاصل از تاپسیس (شکل ۳) نیز الگوی مشابهی را نشان داد. در هر چهار ترکیب شامل T-Eq، T-En، T-CRITIC و T-GA، تیمار اسید آمینه در شرایط تنش آبی (WS × Amino acid) به‌ترتیب با مقادیر ۰/۹۰۳، ۰/۹۹۳، ۰/۹۳ و ۰/۸۹۴ در رتبه نخست قرار گرفت. همچنین، تیمار جلبک دریایی با تنش آبی (WS × Seaweed) در هر چهار روش تاپسیس رتبه دوم را به خود اختصاص داد. بررسی شرایط پذیرش ویکور (شکل ۴) نشان داد که اختلاف بین مقادیر Q مربوط به گزینه اول و دوم برای روش‌های وزن‌دهی برابر با ۰/۰۴۳۵، ۰/۰۹۴۰، ۰/۰۳۸۴ و ۰/۲۲۱۶ به‌ترتیب برای وزن‌های مساوی، آنتروپی، کریتیک و الگوریتم ژنتیک بود. بنابراین، شرط مزیت قابل قبول تنها در روش وزن‌دهی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برقرار شد (۰/۲۲۲ بیشتر از ۰/۱۱۱)، در حالی که شرط دوم، یعنی پذیرش ثبات راه‌حل، در هر چهار روش وزن‌دهی برقرار بود. این یافته نشان می‌دهد که وزن‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک علاوه بر ایجاد تمایز کافی بین گزینه اول و دوم، از نظر معیارهای استاندارد VIKOR نیز یک راه‌حل سازشی قابل قبول ارائه می‌کنند. از منظر قدرت تفکیک، مقدار جداسازی شاخص ویکور در روش GA-VIKOR برابر با ۰/۲۲۲ که حدود پنج برابر بیشتر از روش یکسان (۰/۰۴۴) بود. این فاصله بیشتر بین شاخص ویکور تیمار اول و دوم، به تصمیم‌گیرنده اطمینان بالاتری می‌دهد که انتخاب تیمار اسید آمینه در شرایط تنش آبی (WS × Amino acid) قطعی و مستحکم است. در مجموع، ثبات رتبه نخست تیمار اسید آمینه در شرایط تنش آبی در تمامی هشت ترکیب نشان می‌دهد که برتری این تیمار به روش خاص وزن‌دهی یا الگوریتم رتبه‌بندی وابسته نبوده و از پایداری بالایی در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برخوردار است.



شکل ۴- بررسی شرایط پذیرش راه‌حل بهینه بر اساس روش ویکور

Figure 4. Evaluation of the acceptance conditions for the optimal solution using the VIKOR method

رتبه‌بندی تیمارهای آبیاری نرمال

در شرایط آبیاری نرمال، الگوی کاملاً متفاوتی مشاهده شد (جدول ۴). نتایج رتبه‌بندی جداگانه تیمارهای آبیاری نرمال نشان داد که NI × Humic acid در تمامی هشت ترکیب تصمیم‌گیری شامل V-Eq، V-En، V-CRITIC، V-GA، T-Eq، T-En، T-CRITIC و T-GA به‌طور یکسان رتبه نخست را کسب کرد و میانگین رتبه آن برابر با یک بود. این ثبات بیانگر برتری و پایداری عملکرد اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال، مستقل از روش وزن‌دهی و الگوریتم رتبه‌بندی است. در رتبه‌های بعدی، NI × Fulvic acid و NI × Seaweed قرار گرفتند که میانگین رتبه هر دو تیمار ۲/۵ بود؛ با این حال، جایگاه آن‌ها در روش‌های مختلف به‌صورت متناوب بین رتبه‌های دوم و سوم تغییر کرد.

جدول ۴- رتبه‌بندی جداگانه تیمارهای آبیاری نرمال

Table 4. Separate Ranking of Normal Irrigation Treatments

تیمار Treatment	V-Eq	V-En	V-CRITIC	V-GA	T-Eq	T-En	T-CRITIC	T-GA	میانگین رتبه Mean Rank
نرمال × اسید هیومیک (NI × Humic acid)	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0
نرمال × اسید فولویک (NI × Fulvic acid)	3	2	3	2	3	2	3	2	2.5
نرمال × جلبک دریایی (NI × Seaweed extract)	2	3	2	3	2	3	2	3	2.5
نرمال × اسید آمینه (NI × Amino acid)	4	5	4	4	4	4	4	4	4.1
نرمال × شاهد (NI × Control)	5	4	5	5	5	5	5	5	4.9

تیمار NI × Amino acid با میانگین رتبه ۴/۱ در جایگاه چهارم و NI × Control با میانگین رتبه ۴/۹ در رتبه پنجم قرار گرفتند. بنابراین، در شرایط آبیاری نرمال، اسید هیومیک به‌طور مشخص بر سایر محرک‌های زیستی برتری داشت، در حالی که تیمار شاهد در تمام ترکیب‌ها ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد. این الگوی رتبه‌بندی با نتایج عملکرد و کیفیت محصول نیز همخوانی داشت (جدول ۵).

تیمار NI × Humic acid با عملکرد دانه ۳۸۴۴ کیلوگرم در هکتار، بالاترین عملکرد را در میان تیمارهای آبیاری نرمال به خود اختصاص داد و نسبت به شاهد (3369کیلوگرم در هکتار) ۱۴/۱ درصد افزایش عملکرد ایجاد کرد.

همچنین، این تیمار با ۴۳/۹ درصد روغن، بالاترین درصد روغن را نیز ثبت کرد. پس از آن، تیمارهای NI × Fulvic acid و NI × Seaweed به‌ترتیب عملکرد ۳۵۷۹ و ۳۵۶۹ کیلوگرم در هکتار داشتند که معادل ۶/۲ و ۵/۹ درصد افزایش نسبت به شاهد بود. درصد روغن این دو تیمار نیز به‌ترتیب ۴۱/۴ و ۴۲/۸ درصد گزارش شد. تیمار NI × Amino acid با عملکرد ۳۵۰۲ کیلوگرم در هکتار و افزایش ۳/۹ درصدی نسبت به شاهد، در جایگاه پایین‌تری قرار گرفت؛ هرچند درصد روغن آن (۴۲/۸ درصد) نسبتاً مطلوب بود.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال مؤثرترین محرک زیستی بود و برتری آن هم در رتبه‌بندی چندمعیاره و هم در شاخص‌های مستقیم عملکرد و کیفیت دانه مشاهده شد.

جدول ۵- عملکرد دانه و درصد روغن تیمارهای محرک زیستی تحت آبیاری نرمال و میزان بهبود عملکرد نسبت به شاهد

Table 5. Seed Yield and Oil Content of Biostimulant Treatments under Normal Irrigation and Their Improvement in Yield Relative to the Control

تیمار Treatment	عملکرد دانه Seed Yield (Kg ha^{-1})	بهبود نسبت به شاهد Improvement vs. Control	درصد روغن Oil Content
نرمال × شاهد (NI × Control)	3369	—	40.6
نرمال × اسید هیومیک (NI × Humic acid)	3844	+14.1%	43.9
نرمال × اسید فولویک (NI × Fulvic acid)	3579	+6.2%	41.4
نرمال × جلبک دریایی (NI × Seaweed extract)	3569	+5.9%	42.8
نرمال × اسید آمینه (NI × Amino acid)	3502	+3.9%	42.8

رتبه‌بندی تیمارهای تنش آبی

در تحلیل جداگانه پنج تیمار تحت تنش آبی، رتبه‌بندی مستقل انجام شد (جدول ۶). در این زیرمجموعه، WS × Amino acid در هر ۸ روش رتبه اول را کسب کرد. WS × Seaweed در هر ۸ روش رتبه دوم بود و WS × Humic acid در هفت روش رتبه سوم داشت و تنها در روش T-En به رتبه چهارم تنزل یافت؛ در مقابل، WS × Fulvic acid در همین روش به رتبه سوم ارتقا یافت. WS × Fulvic acid در اکثر روش‌ها رتبه چهار و WS × Control(شاهد) در هر ۸ روش رتبه پنجم (آخر) قرار گرفت.

نتایج جدول (۷) نشان داد که استفاده از محرک‌های زیستی تحت شرایط تنش آبی، در مقایسه با تیمار شاهد، موجب بهبود قابل‌توجه عملکرد دانه و بهره‌وری آب شد.

جدول ۶- رتبه‌بندی جداگانه تیمارهای تنش آبی

Table 6. Separate Ranking of Water Stress Treatments

تیمار Treatment	V-Eq	V-En	V-CRITIC	V-GA	T-Eq	T-En	T-CRITIC	T-GA	میانگین رتبه Mean Rank
تنش آبی × اسید آمینه (WS × Amino acid)	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0
تنش آبی × جلبک دریایی (WS × Seaweed extract)	2	2	2	2	2	2	2	2	2.0
تنش آبی × اسید هیومیک (WS × Humic acid)	3	3	3	3	3	4	3	3	3.1
تنش آبی × اسید فولویک (WS × Fulvic acid)	4	4	4	4	4	3	4	4	3.9
تنش آبی × شاهد (WS × Control)	5	5	5	5	5	5	5	5	5.0

جدول ۷- عملکرد دانه و بهره‌وری آب تیمارهای محرک زیستی تحت تنش آبی و میزان بهبود نسبت به شاهد

Table 7. Seed Yield and Water Productivity of Biostimulant Treatments under Water Stress and Their Improvement Relative to the Control

تیمار Treatment	عملکرد دانه Seed Yield (Kg ha^{-1})	بهبود نسبت به شاهد Improvement vs. Control	بهره‌وری آب Water Productivity (Kg/m^3)	بهبود نسبت به شاهد Improvement vs. Control
تنش آبی × شاهد (WS × Control)	3002	—	1.40	—
تنش آبی × اسید آمینه (WS × Amino acid)	3703	+23.4%	1.79	+27.9%
تنش آبی × جلبک دریایی (WS × Seaweed extract)	3544	+18.1%	1.69	+20.7%
تنش آبی × اسید هیومیک (WS × Humic acid)	3422	+14.0%	1.63	+16.4%
تنش آبی × اسید فولویک (WS × Fulvic acid)	3411	+13.6%	1.63	+16.4%

در میان تیمارهای مورد بررسی، WS × Amino acid با عملکرد ۳۷۰۳ کیلوگرم در هکتار بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد که نسبت به شاهد (۳۰۰۲ کیلوگرم در هکتار) بیانگر ۲۳/۴ درصد افزایش بود. این تیمار همچنین با بهره‌وری آب ۱/۷۹ کیلوگرم در مترمکعب، بیشترین مقدار را در شرایط تنش ثبت کرد و نسبت به شاهد با مقدار ۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب، ۲۷/۹ درصد بهبود نشان داد. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب اسید آمینه در شرایط محدودیت آب و توانایی آن در حفظ تولید هم‌زمان با افزایش کارایی مصرف آب است.

پس از اسید آمینه، تیمار WS × Seaweed با عملکرد ۳۵۴۴ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۶۹ کیلوگرم در متر مکعب در جایگاه دوم قرار گرفت. این تیمار به‌ترتیب ۱۸/۱ درصد افزایش عملکرد و ۲۰/۷ درصد افزایش بهره‌وری آب نسبت به شاهد ایجاد کرد. تیمار WS × Humic acid با دستیابی به عملکرد ۳۴۲۲ کیلوگرم در هکتار، نسبت به شاهد ۱۴ درصد برتری داشت و بهره‌وری آب آن نیز به ۶۳/۱ کیلوگرم در مترمکعب رسید. در تیمار WS × Fulvic acid نیز عملکرد ۳۴۱۱ کیلوگرم در هکتار ثبت شد که بیانگر افزایش ۱۳/۶ درصدی نسبت به شاهد بود؛ همچنین بهره‌وری آب این تیمار با مقدار ۱/۶۳ کیلوگرم در مترمکعب، در مقایسه با شاهد به میزان ۱۶/۴ درصد بهبود یافت.

در مجموع، تمامی محرک‌های زیستی در شرایط تنش آبی موجب افزایش عملکرد دانه و بهره‌وری آب نسبت به شاهد شدند، اما اسید آمینه بیشترین اثر مثبت را نشان داد و پس از آن عصاره جلبک دریایی، اسید هیومیک و اسید فولویک قرار گرفتند. این نتایج با رتبه‌بندی چندمعیاره تیمارهای تنش آبی نیز مطابقت دارد و برتری WS × Amino acid را به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه برای شرایط کم‌آبی تأیید می‌کند.

مقایسه تطبیقی دو شرایط آبیاری

نتایج مقایسه رتبه محرک‌های زیستی در دو شرایط آبیاری (جدول ۸) نشان داد که پاسخ محرک‌های زیستی به وضعیت تأمین آب متفاوت بود و برتری هر محرک به شرایط آبیاری وابسته است. در شرایط تنش آبی (WS)، اسید آمینه با رتبه اول، بهترین محرک زیستی شناخته شد، در حالی که در شرایط آبیاری نرمال (NI) همین محرک با رتبه چهارم عملکرد پایین‌تری نسبت به سایر محرک‌ها داشت. این تغییر رتبه نشان می‌دهد که اثر اسید آمینه در شرایط محدودیت آب برجسته‌تر بوده و می‌تواند در شرایط تنش نقش مؤثرتری در حفظ عملکرد و بهره‌وری آب ایفا کند.

جدول ۸- مقایسه رتبه محرک‌های زیستی تحت تنش آبی و آبیاری نرمال و تفسیر عملکرد آن‌ها

Table 8. Comparison of Biostimulant Rankings under Water Stress and Normal Irrigation and Interpretation of Their Performance

محرک زیستی Biostimulant	رتبه در شرایط تنش آبی Rank in WS	رتبه در شرایط آبیاری نرمال Rank in NI	تفسیر Interpretation
اسید آمینه Amino acid	1	4	اثر کاربرد اسید آمینه در شرایط تنش آبی بارزتر بود؛ با این حال، تحت شرایط آبیاری نرمال نیز به عملکردی بالاتر از تیمار شاهد منجر شد The effect of amino acid application was more pronounced under water-stress conditions; however, it also resulted in higher yield than the control under normal irrigation conditions
اسید هیومیک Humic acid	3	1	در شرایط آبیاری نرمال بهترین عملکرد را دارد Best under normal irrigation
جلبک دریایی Seaweed	2	2–3	در هر دو شرایط عملکرد مطلوبی دارد Performs well under both conditions
اسید فولویک Fulvic acid	4	2–3	در شرایط نرمال بهتر از تنش عمل می‌کند Performs better under normal irrigation
شاهد Control	5	5	در هر دو شرایط ضعیف‌ترین گزینه است Consistently the lowest-ranked option

در مقابل، اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال با رتبه اول، بهترین عملکرد را در میان محرک‌های زیستی داشت، اما در شرایط تنش آبی به رتبه سوم کاهش یافت. این نتیجه نشان می‌دهد که مزیت نسبی اسید هیومیک در شرایط تأمین آب کافی بیشتر آشکار شده است. عصاره جلبک دریایی در هر دو شرایط عملکرد مطلوبی نشان داد و با رتبه دوم در شرایط تنش و رتبه دوم تا سوم در شرایط آبیاری نرمال، از ثبات نسبی برخوردار بود. این الگو نشان‌دهنده قابلیت مناسب این محرک برای عملکرد قابل قبول در دامنه متفاوت شرایط آبیاری است.

اسید فولویک نیز در شرایط آبیاری نرمال با رتبه دوم تا سوم، عملکرد بهتری نسبت به شرایط تنش آبی با رتبه چهارم داشت؛ بنابراین، اثر آن در شرایط نرمال بیشتر نمایان شد. در نهایت، تیمار شاهد در هر دو شرایط آبیاری رتبه پنجم را به خود اختصاص داد و ضعیف‌ترین گزینه در میان تیمارهای مورد بررسی بود. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب محرک زیستی مناسب باید متناسب با شرایط آبیاری انجام شود؛ به‌گونه‌ای که اسید آمینه برای شرایط تنش آبی و اسید هیومیک برای شرایط آبیاری نرمال مناسب‌ترین گزینه‌ها بودند، در حالی که جلبک دریایی عملکردی نسبتاً پایدار در هر دو شرایط داشت.

تحلیل وابستگی بین معیارها

بررسی همبستگی بین معیارهای تصمیم‌گیری نشان داد که رابطه بین بهره‌وری آب (WP) و عملکرد دانه بسیار ضعیف و غیرمعنی‌دار بود ($r = -0.0298$ ،$p = 0.9349$)، در حالی که بین بهره‌وری آب و آب مصرفی همبستگی منفی بسیار قوی و معنی‌داری مشاهده شد ($r = -0.9480$ ،$p < 0.001$). همچنین، رابطه بین عملکرد و آب مصرفی مثبت، اما غیرمعنی‌دار بود ($r = 0.3405$ ،$p = 0.3357$). این همبستگی بسیار بالا نشان می‌دهد که دو معیار بهره‌وری آب و آب مصرفی تا حد زیادی اطلاعات یکسانی را حمل می‌کنند و در روش‌های وزن‌دهی داده‌محور مانند آنتروپی شانون و کریتیک، این همپوشانی اطلاعاتی می‌تواند به تخصیص وزن نامتناسب به یکی از دو معیار منجر شود؛ همان‌گونه که در نتایج مشاهده شد، روش آنتروپی وزن بالایی به آب مصرفی (۰/۴۹۱) و وزن بالایی به بهره‌وری آب (۰/۴۴۷) اختصاص داد. بنابراین، اگرچه بهره‌وری آب و آب مصرفی از نظر آماری ارتباط نزدیکی با یکدیگر داشتند، حذف معیار بهره‌وری آب از مجموعه معیارهای تصمیم‌گیری تغییری در انتخاب گزینه برتر ایجاد نکرد و تیمار اسید آمینه با تنش آبی همچنان در رتبه نخست قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد که انتخاب گزینه برتر به حضور هم‌زمان

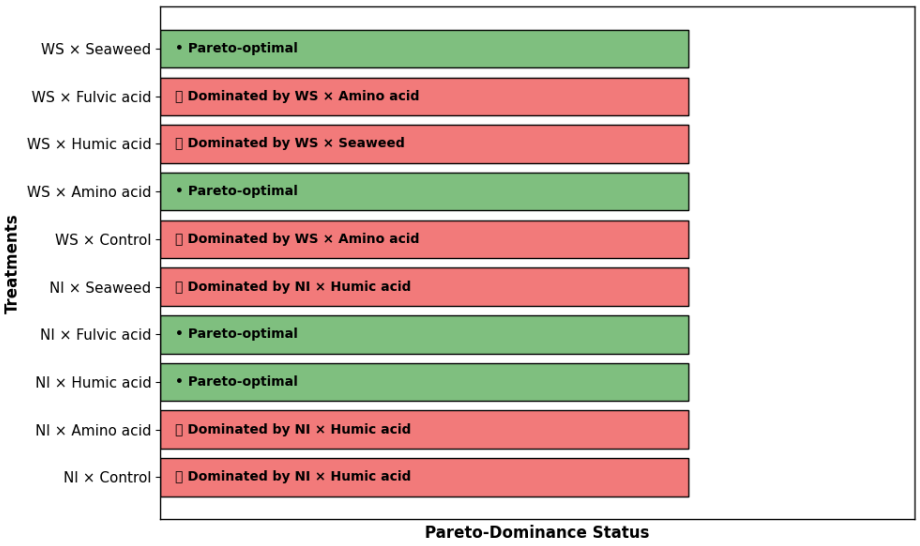
معیار بهره‌وری آب وابسته نبوده و از پایداری مناسبی در برابر حذف این معیار برخوردار است.

تحلیل حساسیت مونت‌کارلو

تحلیل حساسیت مونت‌کارلو نشان داد که تیمار اسید آمینه با تنش آبی در هر ۱۰۰۰ تکرار، هم در روش تاپسیس و هم در روش ویکور، رتبه نخست خود را حفظ کرد؛ به‌عبارت دیگر، نرخ حفظ رتبه اول برای این تیمار در هر دو روش برابر با ۱۰۰ درصد بود. این نتیجه نشان می‌دهد که انتخاب این تیمار به مجموعه خاصی از وزن‌ها وابسته نبوده و رتبه‌بندی حاصل از تحلیل چندمعیاره از پایداری بالایی در برابر تغییرات قابل‌توجه در وزن معیارها برخوردار است.

تحلیل پارتو

تحلیل غلبه پارتو بر اساس مجموعه کامل چهار معیار (بهره‌وری آب، درصد روغن، آب مصرفی و عملکرد دانه) انجام شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که چهار گزینه شامل NI × Humic acid، NI × Fulvic acid، WS × Amino acid و WS × Seaweed توسط هیچ تیمار دیگری در تمامی معیارها به‌طور هم‌زمان مغلوب نشدند و به‌عنوان گزینه‌های غیرمغلوب (Pareto-optimal) شناخته شدند. در مقابل، شش تیمار دیگر مغلوب (Dominated) تشخیص داده شدند؛ به‌طوری‌که برای هر یک، حداقل یک تیمار غالب وجود داشت که در تمامی چهار معیار وضعیت مساوی یا بهتری داشت. برای نمونه، تیمار NI × Control توسط NI × Humic acid و تیمار WS × Control توسط WS × Amino acid مغلوب شدند. شناسایی چند گزینه غیرمغلوب بیانگر وجود مبادله میان معیارهای تصمیم‌گیری و تأییدکننده ماهیت چندمعیاره مسئله ارزیابی تیمارهاست؛ به‌گونه‌ای که حذف کامل برخی گزینه‌ها بر اساس یک معیار منفرد امکان‌پذیر نیست.



شکل ۵- جبهه پارتو و گزینه‌های غیرمغلوب حاصل از تحلیل غلبه پارتو در فضای معیارهای تصمیم‌گیری

Figure 5. Pareto front and non-dominated alternatives obtained from Pareto dominance analysis in the decision-criteria space

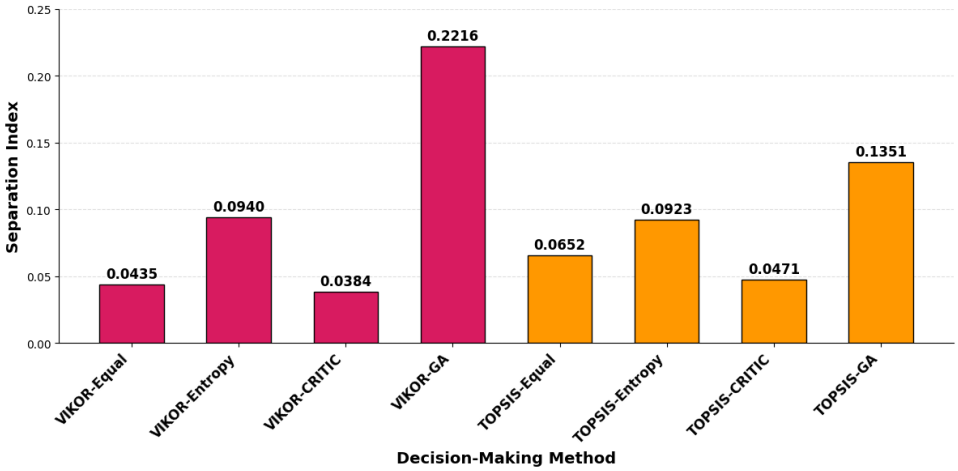
پایداری الگوریتم ژنتیک

نتایج پایداری وزن‌های بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک با ۱۰ عدد اولیه مختلف تصادفی نشان داد که وزن‌های بهینه در اجراهای مختلف در محدوده بسیار نزدیکی به یکدیگر قرار داشتند؛ به‌طوری‌که وزن بهره‌وری آب بین ۰/۱۹۳۸ تا ۰/۱۹۸۰، وزن درصد روغن بین ۰/۰۰۹۵ تا ۰/۰۱۲۸ و وزن آب مصرفی در محدوده ۰/۰۰۹۵ تا ۰/۰۲۲۴ قرار گرفت، در حالی که وزن عملکرد دانه بین ۰/۷۷۱۱ و ۰/۷۸۳۱ تغییر کرد. همچنین، مقدار تابع برازش در تمام اجراها تقریباً یکسان بود و انحراف معیار آن حدود ۰/۰۰۰۰۵۲ به‌دست آمد. این تغییرپذیری بسیار محدود نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در اجراهای مختلف به پاسخ‌های بسیار مشابه همگرا شده و نتایج حاصل از وزن‌دهی بهینه از پایداری مناسبی برخوردار است.

قدرت تفکیک روش‌ها

شاخص قدرت تفکیک برای هر یک از هشت ترکیب روش‌های وزن‌دهی و رتبه‌بندی محاسبه شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که GA-VIKOR با مقدار ۰/۲۲۲ بیشترین قدرت تفکیک را در میان روش‌های مورد بررسی ایجاد کرد. این مقدار به‌ترتیب حدود ۵، ۶ و ۲/۴ برابر بیشتر از ویکور با وزن‌دهی یکسان (۰/۰۴۴)، ویکور با وزن‌دهی کریتیک (۰/۰۳۸)، ویکور با وزن‌دهی آنتروپی شانون (۰/۰۹۴) بود. در میان ترکیب‌های مبتنی بر تاپسیس نیز، GA-TOPSIS با مقدار ۰/۱۳۵ در رتبه دوم از نظر قدرت تفکیک قرار گرفت که به‌ترتیب ۲/۱، ۲/۹ و ۱/۵ برابر بیشتر از تاپسیس با وزن یکسان (۰/۰۶۵)، تاپسیس با وزن کریتیک (۰/۰۴۷) و تاپسیس با وزن آنتروپی شانون (۰/۰۹۲) بود.

بنابراین، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزن معیارها، نسبت به روش‌های وزن‌دهی ثابت و داده‌محور، موجب افزایش قابل‌توجه قدرت تفکیک گزینه‌های برتر شده است؛ به‌ویژه ترکیب GA-VIKOR بیشترین توانایی را در ایجاد تمایز میان گزینه اول و دوم نشان داد.



شکل ۶- مقایسه قدرت تفکیک هشت ترکیب تصمیم‌گیری (ویکور در مقابل تاپسیس)

Figure 6. Comparison of separation power of eight decision-making combinations (VIKOR vs. TOPSIS)

پایداری رتبه‌بندی

نتایج تحلیل پایداری (جدول ۹) نشان داد هر ۸ ترکیب تصمیم‌گیری شامل ویکور و تاپسیس با وزن‌های یکسان، آنتروپی، کریتیک و الگوریتم ژنتیک بدون استثنا تیمار WS × Amino acid را به‌عنوان بهترین گزینه معرفی کردند. این درجه از توافق (۱۰۰ درصد) در ادبیات تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل‌توجه است، زیرا مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تغییر روش وزن‌دهی یا الگوریتم رتبه‌بندی اغلب به تغییر گزینه برتر منجر می‌شود (Mulliner et al., 2016; Salimi and Alikhanzadeh, 2021).

ضریب همبستگی اسپیرمن برای تمام ۲۸ جفت ممکن از ۸ روش محاسبه گردید. میانگین این ضریب برابر با ۰/۹۰۴ به‌دست آمد که بیانگر توافق بسیار بالا در کل ساختار رتبه‌بندی است. نکته قابل‌توجه آن است که شش روش V-En، V-CRITIC، T-Eq، T-En، V-Eq و T-CRITIC با یکدیگر توافق کامل داشتند ($\rho = 1.0$). دو روش مبتنی بر GA (V-GA و T-GA) نیز توافق بالایی با سایر روش‌ها نشان دادند، هرچند V-GA به دلیل جابه‌جایی در رتبه‌های میانی کمترین همبستگی را داشت ($\rho \approx 0.745$). این تفاوت جزئی تأثیری بر انتخاب گزینه برتر نداشت و صرفاً نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ویکور به تغییر وزن‌ها در رتبه‌های غیربرتر است.

تحلیل جداگانه تیمارهای تنش آبی نشان داد که WS × Amino acid در هر ۸ روش رتبه نخست و WS × Control در هر ۸ روش رتبه آخر را کسب کرد. ساختار رتبه‌بندی در شرایط تنش تقریباً در همه روش‌ها یکسان بود؛ تنها تفاوت جزئی در جایگاه سوم و چهارم (هیومیک و فولویک) در دو روش مشاهده شد. در شرایط آبیاری نرمال نیز NI × Humic acid در هر ۸ روش رتبه نخست را به خود اختصاص داد و NI × Control در اکثر روش‌ها رتبه آخر را داشت. این نتایج نشان می‌دهد که گزینه برتر در هر دو شرایط آبیاری، مستقل از روش وزن‌دهی و الگوریتم رتبه‌بندی ثابت باقی مانده است؛ با این حال، در برخی روش‌ها جابه‌جایی محدودی در جایگاه تیمارهای میانی مشاهده شد.

جدول ۹- خلاصه تحلیل پایداری رتبه‌بندی

Table 9. Summary of ranking robustness analysis

جنبه پایداری Aspect	روش‌ها/حالت‌ها Methods/States	نتیجه Result	سطح پایداری Robustness Level
توافق در گزینه برتر Best alternative agreement	۸ ترکیب 8 combinations	اسید آمینه تحت تنش آبی در همه روش‌ها اول شد WS × Amino acid ranked first in all methods	(۱۰۰٪) کامل Complete (100%)
توافق در کل ساختار رتبه‌بندی Overall ranking agreement	۲۸ جفت 28 pairs	میانگین $\rho = 0.9039$ Mean $\rho = 0.9039$	بسیار بالا Very high
پایداری در شرایط تنش آبی(WS) WS subset stability	۸ روش 8 methods	Amino > Seaweed > Humic ≈ Fulvic > Control Amino > Seaweed > Humic ≈ Fulvic > Control	بسیار بالا، همراه با جابه‌جایی محدود در رتبه‌های میانی Very high, with limited swaps among middle ranks
پایداری در شرایط نرمال(NI) NI subset stability	۸ روش 8 methods	Humic > Fulvic ≈ Seaweed > Amino > Control Humic > Fulvic ≈ Seaweed > Amino > Control	بسیار بالا، همراه با جابه‌جایی محدود در رتبه‌های میانی Very high, with limited swaps among middle ranks
استقلال از فلسفه وزن‌دهی Independence from weighting philosophy	۴ فلسفه 4 philosophies	بدون تغییر گزینه برتر No change in best alternative	کامل Complete
استقلال از الگوریتم رتبه‌بندی Independence from ranking algorithm	۲ الگوریتم 2 algorithms	بدون تغییر گزینه برتر No change in best alternative	کامل Complete

همچنین، نتایج نشان داد که تغییر فلسفه وزن‌دهی از وزن یکسان بدون فرض، به آنتروپی و کریتیک داده‌محور، و سپس به الگوریتم ژنتیک بهینه‌ساز هیچ تأثیری بر گزینه برتر نداشت. به‌طور مشابه، تغییر الگوریتم رتبه‌بندی از تاپسیس (مبتنی بر فاصله اقلیدسی) به ویکور (مبتنی بر منطق سازش) نیز نتوانست نتیجه را تغییر دهد. این استقلال کامل از روش تحلیل نشان می‌دهد که برتری WS × Amino acid پدیده‌ای ذاتی در داده‌هاست و حاصل انتخاب یک روش خاص نیست.

بحث

یافته اصلی این پژوهش، توافق هر هشت ترکیب تصمیم‌گیری بر برتری تیمار WS × Amino acid بود. چنین سطحی از توافق در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل‌توجه است و می‌تواند نشان‌دهنده پایداری گزینه منتخب در چارچوب روش‌های مورد بررسی باشد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییر روش وزن‌دهی یا الگوریتم رتبه‌بندی می‌تواند گزینه برتر را تغییر دهد.

مولینر و همکاران (Mulliner et al., 2016) در مقایسه روش‌های تحلیل چندمعیاره گزارش کردند که رتبه‌بندی گزینه‌ها در بیش از ۵۰ درصد موارد بین روش‌های مختلف متفاوت است. سلیم و علی‌خانزاده (Salimi and Alikhanzadeh, 2021) نیز در ارزیابی سیستم‌های آبیاری نشان دادند که گزینه برتر بین تاپسیس و ویکور در بیش از ۴۰ درصد موارد تغییر می‌کند. در مقابل، در پژوهش حاضر هر ۸ روش از وزن‌دهی ساده یکسان تا بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک به نتیجه یکسانی رسیدند.

این پایداری را می‌توان با مفهوم برتری متوازن تبیین کرد. تیمار WS × Amino acid در سه معیار بهره‌وری آب، آب مصرفی و عملکرد دانه وضعیت مطلوبی داشت؛ به‌طوری‌که در بهره‌وری آب و کمترین میزان آب مصرفی رتبه نخست و در عملکرد دانه رتبه دوم را به خود اختصاص داد. در مقابل، در معیار درصد روغن از برتری مشابهی برخوردار نبود. این الگو باعث می‌شود که صرف‌نظر از وزن معیارها، این تیمار همیشه به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر باشد. حاجکوویچ و هیگنز (Hajkowicz and Higgins, 2008) در بررسی روش‌های تحلیل چندمعیاره در مدیریت منابع آب نشان دادند که وقتی یک گزینه از برتری ذاتی و متوازن برخوردار باشد، تغییر روش تحلیل اهمیت عملی خود را از دست می‌دهد. صارمی و مکنون (Saremi and Maknoon, 2020) نیز در مطالعه‌ای بر روی مدیریت آبیاری گزارش کردند که پایداری بالای رتبه‌بندی معمولاً نشان‌دهنده وجود یک گزینه با برتری واضح است. نکته قابل‌توجه آن است که در پژوهش حاضر، چهار تیمار برتر همگی از شرایط تنش آبی

(WS)بودند. این الگو نشان می‌دهد که ترکیب کم‌آبیاری کنترل‌شده با محرک‌های زیستی مناسب می‌تواند نه تنها عملکرد را حفظ کند، بلکه با کاهش مصرف آب، بهره‌وری را نیز افزایش دهد. این یافته با نتایج Geerts و Raes (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد که نشان دادند راهبردهای کم‌آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌توانند به حداکثر بهره‌وری آب منجر شوند.

در شرایط تنش آبی، اسید آمینه با میانگین رتبه اول در هر ۸ روش برتر بود و عملکرد دانه را ۲۳٪ و بهره‌وری آب را ۲۸٪ نسبت به شاهد افزایش داد. این نتایج با ادبیات فیزیولوژی تنش هم‌خوانی کامل دارد. Calvo و همکاران (۲۰۱۴) در یک مرور جامع نشان دادند که اسیدهای آمینه به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های اسمزی عمل می‌کنند و از طریق حفظ فشار تورژسانس سلولی، گیاه را در شرایط کمبود آب محافظت می‌کنند. Rouphael و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که اسیدهای آمینه با افزایش سنتز پرولین و فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز) ، خسارت اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی را کاهش می‌دهند.

از دیدگاه فیزیولوژیک، نکته قابل توجه در نتایج حاضر آن است که کاربرد محرک‌های زیستی در شرایط تنش آبی با افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد همراه بود؛ به‌طوری‌که تیمار اسید آمینه، عصاره جلبک دریایی، اسید هیومیک و اسید فولویک به‌ترتیب موجب افزایش ۲۳، ۱۸، ۱۴ و ۱۴ درصدی عملکرد شدند. این الگو نشان می‌دهد که کاربرد محرک‌های زیستی می‌تواند در کاهش اثرات منفی محدودیت آب بر عملکرد کلزا مؤثر باشد، اگرچه میزان پاسخ به نوع محرک وابسته بود. در میان تیمارهای مورد بررسی، اسید آمینه بیشترین افزایش عملکرد را نشان داد و در شرایط آزمایش حاضر، بالاترین پاسخ عملکردی را ایجاد کرد. این پاسخ می‌تواند با نقش ترکیبات آمینواسیدی در تنظیم اسمزی، حفظ فرایندهای متابولیکی و تقویت سازوکارهای دفاعی گیاه در شرایط کمبود آب مرتبط باشد. با این حال، برتری یک محرک نسبت به سایر محرک‌ها باید با توجه به شدت تنش، رقم، زمان و روش کاربرد و شرایط محیطی تفسیر شود و نمی‌توان آن را به همه شرایط تولید کلزا تعمیم داد.

در شرایط آبیاری نرمال، هیومیک اسید با میانگین رتبه اول در هر ۸ روش برتر بود و عملکرد دانه را ۱۴ درصد افزایش داد. اسید آمینه که در تنش بهترین بود در شرایط نرمال به رتبه چهارم سقوط کرد. این تغییر رتبه مشروط به شرایط آبیاری با یافته‌های Du Jardin (2015) هم‌خوانی دارد که نشان داد اثربخشی محرک‌های زیستی به‌شدت به شرایط محیطی وابسته است.

از منظر مکانیسم عمل، این تفاوت قابل تبیین است. هیومیک اسید عمدتاً از طریق بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تحریک رشد ریشه عمل می‌کند (Calvo et al., 2014). این مکانیسم‌ها در شرایط بدون تنش به حداکثر جذب عناصر غذایی و رشد رویشی منجر می‌شوند. در مقابل، اسید آمینه با مکانیسم‌های دفاعی مرتبط با تنش (تنظیم اسمزی، آنتی‌اکسیدان) عمل می‌کند. مکانیسم‌هایی که در شرایط بدون تنش غیرضروری هستند و اثر چندانی بر رشد نشان نمی‌دهند.

شاخص قدرت تفکیک نشان داد که GA-VIKOR با مقدار ۰/۲۲۲ حدود ۵ برابر بهتر از ویکور با وزن یکسان (۰/۰۴۴) و حدود ۶ برابر بهتر از ویکور با وزن کریتیک (۰/۰۳۸۴) عمل کرد. GA-TOPSIS نیز با مقدار ۰/۱۳۵ عملکرد بهتری نسبت به تاپسیس با وزن‌های معمولی داشت. با این حال، باید توجه داشت که تابع برازش به‌کاررفته در این پژوهش صرفاً بر جداسازی دو گزینه برتر متمرکز است و ساختار رتبه‌بندی کل گزینه‌ها را به‌طور مستقیم وارد بهینه‌سازی نمی‌کند. این انتخاب، اگرچه برای هدف اصلی مطالعه (افزایش قدرت تفکیک گزینه‌های نزدیک) مناسب است، اما می‌تواند به وزن‌هایی منجر شود که برتری گزینه اول را تقویت کنند. بنابراین، پایداری ۱۰۰ درصدی گزینه برتر در همه روش‌ها را باید با احتیاط تفسیر کرد؛ زیرا بخشی از این پایداری ممکن است ناشی از هم‌راستایی تابع هدف GA با معیارهای مورد استفاده در سایر روش‌ها باشد.

این یافته با نتایج Wang و Rangaiah (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد که نشان دادند بهینه‌سازی وزن‌ها با الگوریتم‌های تکاملی می‌تواند کیفیت تصمیم‌گیری را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. Zavadskas و همکاران (۲۰۲۰) در مرور جامع توسعه تاپسیس تأکید کردند که رویکردهای تلفیقی فراابتکاری تحلیل چندمعیاره در حال تبدیل شدن به استاندارد جدید هستند. نکته قابل‌توجه دیگر، برتری GA-VIKOR نسبت به GA-TOPSISدر قدرت تفکیک است (۰/۲۲۲ در مقابل ۰/۱۳۵). این تفاوت به ماهیت متفاوت دو الگوریتم برمی‌گردد: ویکور با مکانیسم «حداقل تأسف فردی» به تغییرات وزن حساس‌تر است و الگوریتم ژنتیک می‌تواند این حساسیت را به نفع حداکثر جداسازی مهار کند. Opricovic و Tzeng (۲۰۰۴) در مقایسه این دو روش نشان دادند که VIKOR در شرایطی که گزینه‌ها به هم نزدیک‌اند، قادر به تفکیک بهتری است. یافته‌های این پژوهش دو پیام کاربردی مهم دارند.

نخست، انتخاب محرک زیستی باید متناسب با شرایط آبیاری و شدت تنش آب انجام شود. در شرایط محدودیت آب، تیمار اسید آمینه بیشترین افزایش عملکرد را در آزمایش حاضر ایجاد کرد، در حالی که در شرایط دسترسی کافی به آب، اسید هیومیک بالاترین عملکرد را نشان داد. این الگو بیانگر آن است که اثربخشی محرک‌های زیستی می‌تواند به شرایط محیطی و وضعیت آبی گیاه وابسته باشد و بنابراین توصیه یک محرک واحد برای همه شرایط آبیاری ممکن است رویکرد مناسبی نباشد. از این دیدگاه، مدیریت آبیاری و انتخاب نهاده‌های زراعی باید متناسب با شرایط موجود و هدف تولید انجام شود؛ رویکردی که با مفهوم مدیریت تطبیقی آب و استفاده از راهبردهای آبیاری متناسب با شرایط محیطی سازگار است (Geerts & Raes, 2009).

دوم، نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد محرک‌های زیستی در شرایط تنش آبی می‌تواند عملکرد کلزا را نسبت به شاهد افزایش دهد. در شرایط تنش آبی، افزایش عملکرد تیمارهای اسید آمینه، عصاره جلبک دریایی، اسید هیومیک و اسید فولویک نسبت به شاهد به‌ترتیب ۲۳، ۱۸، ۱۴ و ۱۴ درصد بود. بنابراین، در شرایط آزمایش حاضر، حتی محرک‌هایی که عملکرد آن‌ها کمتر از اسید آمینه بود نیز توانستند بخشی از کاهش عملکرد ناشی از محدودیت آب را جبران کنند. این موضوع از نظر کاربردی اهمیت دارد، زیرا در صورت محدودیت دسترسی به یک محرک خاص، سایر محرک‌های مورد بررسی نیز می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های جایگزین در مدیریت تنش آبی مورد توجه قرار گیرند؛ البته انتخاب نهایی باید بر اساس میزان پاسخ عملکردی، هزینه کاربرد، دسترسی به نهاده و شرایط مزرعه انجام شود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که هر هشت ترکیب تصمیم‌گیری بدون استثنا تیمار تنش آبی × اسید آمینه را به‌عنوان گزینه برتر معرفی کردند که بیانگر پایداری بالای این انتخاب است. تحلیل جداگانه نیز نشان داد اسید آمینه در شرایط تنش و اسید هیومیک در شرایط نرمال بهترین عملکرد را داشتند؛ بنابراین، توصیه محرک زیستی باید متناسب با وضعیت آبیاری انجام شود. از منظر روش‌شناختی، رویکرد تلفیقی GA-VIKOR با ایجاد بالاترین قدرت تفکیک، اطمینان تصمیم‌گیری را به‌طور چشمگیری نسبت به روش‌های معمولی افزایش داد؛ لذا استفاده از این رویکرد در شرایطی که خطای تصمیم‌گیری پرهزینه است، ترجیح دارد. با این حال، تفسیر پایداری گزینه منتخب باید با توجه به تمرکز تابع هدف الگوریتم ژنتیک بر جداسازی دو گزینه برتر، با احتیاط انجام شود. محدودیت‌های پژوهش شامل انجام آزمایش در یک منطقه اقلیمی، محدودیت تعداد معیارها (نبود معیارهای اقتصادی و محیط زیستی)، و پارامترهای محدود الگوریتم ژنتیک بود. برای مطالعات آتی، تعمیم چارچوب به سایر محصولات زراعی، استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه، لحاظ کردن هزینه‌های اقتصادی محرک‌ها، بررسی اثرات ترکیبی محرک‌ها و کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی رشد پیشنهاد می‌شود.

عدم تعارض منافع

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

تشکر و قدردانی

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

References

1. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. Expert Systems with Applications, 39(17), 13051–13069. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056
2. Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. Plant and Soil, 383, 3–41. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8
3. Champolivier, L., & Merrien, A. (1996). Effects of water stress applied at different growth stages to Brassica napus L. var. oleifera on yield, yield components and seed quality. European Journal of Agronomy, 5, 153–160. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02004-7
4. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182–197. https://doi.org/10.1109/4235.996017
5. Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. Computers & Operations Research, 22(7), 763–770. https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H
6. 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
7. Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural Water Management, 96(9), 1275–1284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009
8. Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley.
9. Hajkowicz, S., & Higgins, A. (2008). A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. European Journal of Operational Research, 184(1), 255–265. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.045
10. Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. University of Michigan Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/1090.001.0001
11. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9
12. Jensen, C. R., Mogensen, V. O., Mortensen, G., Fieldsend, J. K., Milford, G. F. J., Andersen, M. N., & Thage, J. H. (1996). Seed glucosinolate, oil and protein contents of field-grown rape (Brassica napus L.) affected by soil drying and evaporative demand. Field Crops Research, 47, 93–105. https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00026-3
13. Kaur, H., Wang, L., Stawniak, N., Sloan, R., van Erp, H., Eastmond, P. J., & Bancroft, I. (2020). The impact of reducing fatty acid desaturation on the composition and thermal stability of rapeseed oil. Plant Biotechnology Journal, 18, 983–991. https://doi.org/10.1111/pbi.13263
14. Lotfi, R., Pessarakli, M., Gharavi-Kouchebagh, P., & Khoshvaghti, H. (2015). Physiological responses of Brassica napus to fulvic acid under water stress: Chlorophyll a fluorescence and antioxidant enzyme activity. The Crop Journal, 3(5), 434–439. https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.05.006
15. Mulliner, E., Malys, N., & Maliene, V. (2016). Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. Omega, 59, 146–156. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.013
16. Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. Faculty of Civil Engineering.
17. 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
18. Przybylski, R., Mag, T., Eskin, N. A. M., & McDonald, B. E. (2020). Canola oil. In Edible oil and fat products. https://doi.org/10.1002/047167849X.bio004.pub2
19. Rouphael, Y., & Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture.

Frontiers in Plant Science, 9, 1655. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655

20. Salimi, A. H., & Alikhanzadeh, A. (2021). Sensitivity analysis of TOPSIS and VIKOR methods in selecting the best irrigation system. Water Resources Management, 35, 2345–2360.
21. Saremi, H., & Maknoon, R. (2020). Monte Carlo simulation for sensitivity analysis in TOPSIS: An agricultural water management case study. Agricultural Water Management, 240, 106303. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106303
22. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27(3), 379–423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
23. Siegel, S., & Castellan, N. J. (1988). Nonparametric statistics for the behavioral sciences (2nd ed.). McGraw-Hill.
24. Wang, T. C., & Lee, H. D. (2009). Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights. Expert Systems with Applications, 36(5), 8980–8985. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.11.035
25. Wang, Z., & Rangaiah, G. P. (2017). Application and analysis of methods for selecting an optimal solution from the Pareto front. Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(2), 567–578. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03453
26. Zavadskas, E. K., Mardani, A., Turskis, Z., Jusoh, A., & Nor, K. M. (2020). Development of TOPSIS method to solve complicated decision-making problems: An overview on developments from 2000 to 2019. Sustainability, 12(16), 6452. https://doi.org/10.3390/su12166452