




Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet

Reza Mohammadiki^a , Mohammad Pasandideh^a, Farahnaz Hamdi Holasoo^b, and Vali-Allah Yousef Abadi^b

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

^b Sugar Beet Seed Institute (SBSI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

December 24, 2025

Revised

April 27, 2026

Accepted

May 16, 2026

Published online

June 17, 2026

Keywords

Amino acids,
Humic acid,
Sensitivity analysis,
Stability,
Monte Carlo method.

*Corresponding author's email

rmswri@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is one of the most important sugar-producing crops in arid and semi-arid regions, where water scarcity is a major limiting factor for yield and quality. Drought stress often reduces root growth and sugar yield, necessitating the development of sustainable management strategies to enhance drought tolerance. In recent years, organic growth stimulants such as amino acids and humic substances have attracted increasing attention due to their environmentally friendly nature and potential to improve plant performance under abiotic stresses. These stimulants not only promote physiological and biochemical processes in plants but also enhance soil health and nutrient availability, contributing to overall crop resilience. The objective of this pilot study was to preliminarily assess the effectiveness of different organic growth stimulants in alleviating drought stress effects on sugar beet and to identify superior treatments using an integrated multi-criteria decision-making approach. The findings of this research are expected to provide valuable insights for developing practical, eco-friendly strategies to improve sugar beet productivity under water-limited conditions.

Materials and Methods: This study was conducted at the Kamalshahr Research Station, Karaj, Iran, using a split-plot arrangement within a randomized complete block design. Two irrigation regimes, including normal irrigation and drought stress, were assigned to main plots, while four nutritional treatments (control, amino acid, humic acid, and combined application of growth stimulants) were allocated to subplots. Several quantitative and qualitative traits related to root yield and sugar quality were measured during the growing season. In addition to conventional analysis of variance, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) was employed to rank treatments by simultaneously considering multiple criteria with equal weights. To evaluate the robustness and stability of the rankings, Monte Carlo simulation was applied based on repeated random perturbations of the input data.

Results: The results showed that drought stress markedly reduced root yield and root weight, while increasing root dry matter content (dry root pulp weight / fresh root pulp weight) and pure sugar percentage. Growth stimulant treatments generally improved root yield under both irrigation regimes, with humic acid and the combined application showing more pronounced positive effects. Multi-criteria analysis indicated that under normal irrigation conditions, the amino acid treatment achieved the highest closeness to the ideal solution. In contrast, under drought stress conditions, the combined application of growth stimulants was clearly identified as the superior treatment and ranked first in more than 95 % of Monte Carlo simulation runs, demonstrating a high level of ranking stability.

Conclusion: Although the outcomes of this research are preliminary and derived from a pilot study, the results suggest that organic growth stimulants, particularly the combined application, have considerable potential for mitigating drought stress effects in sugar beet. Moreover, the integration of TOPSIS with Monte Carlo simulation proved to be a powerful and reliable framework for multi-criteria evaluation and early-stage screening of management options. These findings provide a scientific basis for designing more comprehensive field experiments and developing sustainable irrigation and nutritional strategies for sugar beet production under water-limited conditions.

Cite this article: Mohammadikia, R., Pasandideh, M., Hamdi Holasoo, F., Yousef Abadi, V., 2026. Multicriteria Analysis of the Effects of Organic Growth Stimulants on Reducing Damage Caused by Drought Stress in Sugar Beet. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (1), pp 61-79.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370715.807>

Publisher: Soil Science Society of Iran



تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از تنش خشکی در چغندرقد

رضا محمدی کیا^{۱*}، محمد پسندیده^۱، فرحناز حمدی هولاسو^۲ و ولی اله یوسف آبادی^۲

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

^۲ مؤسسه تحقیقات چغندرقد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

به‌منظور بررسی اولیه توان محرک‌های آلی رشد در کاهش آثار تنش خشکی در چغندرقد (*Beta vulgaris* L.)، پژوهشی به‌صورت پیش‌آزمون در ایستگاه تحقیقاتی کمال‌شهر کرج انجام شد. آزمایش به صورت اسپلیت پلات (کرت‌های خردشده) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. عامل اصلی آبیاری در دو سطح (آبیاری نرمال و تنش خشکی) و عامل فرعی تغذیه در چهار سطح (شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک و تیمار تلفیقی) قرار داشت. هر تیمار در هر بلوک با سه تکرار اجرا شد. صفات کمی و کیفی در طول رشد اندازه‌گیری و با تحلیل واریانس و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس همراه با شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارزیابی شد تا بتوان مقایسه دقیقی میان تیمارها با در نظر گرفتن چند شاخص عملکردی و کیفی انجام داد. نتایج نشان داد که تنش خشکی، عملکرد و وزن ریشه را کاهش و درصد ماده خشک خمیر ریشه (نسبت وزن خشک خمیر ریشه به وزن تر خمیر ریشه) و قند خالص را افزایش داد. تیمارهای محرک رشد، به‌ویژه اسید هیومیک و تیمار مصرف تلفیقی، عملکرد ریشه را بهبود دادند که نشان‌دهنده توان بالقوه این تیمارها در کاهش آثار منفی کم‌آبی بودند. تحلیل چندمعیاره حاکی از آن بود که در آبیاری نرمال، اسید آمینه و در تنش خشکی، مصرف تلفیقی تیمارها بهترین گزینه بود و در بیش از ۹۵ درصد شبیه‌سازی‌ها رتبه اول را کسب کرد. این نتایج مقدماتی، ظرفیت بالای رویکرد تلفیقی تاپسیس و مونت‌کارلو را به‌عنوان ابزاری کارآمد برای غربالگری تیمارهای مدیریتی و طراحی آزمایش‌های گسترده‌تر در شرایط خشکی نشان داد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

واژه‌های کلیدی

اسید آمینه،

اسید هیومیک،

پایداری،

تحلیل حساسیت،

روش مونت‌کارلو.

* ایمیل نویسنده مسئول

rmswri@gmail.com

استاد: محمدی کیا، ر.، پسندیده، م.، حمدی هولاسو، ف.، یوسف آبادی، و.، ۱۴۰۵. تحلیل چندمعیاره اثر محرک‌های آلی رشد بر کاهش خسارت ناشی از

تنش خشکی در چغندرقد. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۱) ۴۰، ص ۶۱-۷۹.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.370715.807>



مقدمه

چغندرقد (*Beta vulgaris L.*) گیاهی دولپه‌ای از خانواده *Chenopodiaceae* است و یکی از منابع اصلی تولید شکر در جهان و ایران محسوب می‌شود. در ایران، این محصول از اهمیت اقتصادی بالایی برخوردار است و سطح زیر کشت آن در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ حدود ۱۰۸ هزار هکتار گزارش شده است (FAO, 2021). چغندرقد یک گیاه دوساله است که در سال اول چرخه رشد خود، بخش اعظم انرژی فتوسنتزی را در برگ‌ها تولید کرده و آن را به صورت ساکارز در ریشه ذخیره می‌کند و در شرایط طبیعی پس از مواجهه با سرما در زمستان وارد مرحله زایشی می‌شود و ساقه گل‌دهنده و بذر تولید می‌کند؛ با این حال در زراعت شکر معمولاً این گیاه را فقط برای برداشت ریشه در سال اول کشت و برداشت می‌کنند (Sparkes, 2017). دوره رشد این گیاه بین ۱۷۰ تا ۲۰۰ روز طول می‌کشد و شامل مراحل جوانه‌زنی و استقرار بوته، رشد رویشی، تشکیل عملکرد و رسیدگی محصول است (Levitt, 1980).

در شرایط آبیاری نرمال، عملکرد واقعی گیاه می‌تواند به پتانسیل ژنتیکی نزدیک شود. با این حال، بهره‌برداری کامل از ظرفیت رشد نیازمند مدیریت مناسب تغذیه و استفاده از محرک‌های رشد مؤثر است. محرک‌های رشد آلی-زیستی شامل اسیدهای آمینه، هیومیک و اسیدهای فولویک هستند که با بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و متابولیسی گیاه، رشد، عملکرد و کیفیت محصول را ارتقا می‌دهند (Chen, 2022; Keskin et al., 2025). اسیدهای آمینه نیز به‌عنوان محرک‌های طبیعی رشد، نقش مهمی در بهبود کیفیت و عملکرد چغندرقد دارند و با تأثیر بر سنتز پروتئین، فعال‌سازی مسیرهای متابولیسی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، کارایی فتوسنتز و رشد رویشی گیاه را افزایش می‌دهند (Khan et al., 2012; Anjum et al., 2014). اسیدهای هیومیک با افزایش توسعه سیستم ریشه‌ای، جذب آب و عناصر غذایی را تسهیل کرده و تولید کلروفیل و میزان فتوسنتز برگ‌ها را بهبود می‌دهند (Ampong et al., 2022). این ترکیب با تحریک فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سنتز پروتئین و رشد سلولی باعث افزایش وزن تر و خشک ریشه و درصد قند می‌شود (Naderi et al., 2002). استفاده منظم از اسید هیومیک در شرایط آبیاری نرمال، عملکرد کمی و کیفی محصول را افزایش داده، ضایعات را کاهش و ضریب برداشت شکر را بهبود می‌بخشد (Rose et al., 2014).

اسیدهای فولویک نیز با بهبود جذب عناصر غذایی و افزایش فعالیت آنزیمی، نقش مهمی در ارتقای کیفیت و عملکرد محصول دارند (Rose et al., 2014). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از محرک‌های آلی-زیستی، علاوه بر افزایش عملکرد و

کیفیت ریشه، باعث بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، مانند افزایش سطح برگ، کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی می‌شود (Ampong et al., 2022; Naderi et al., 2002) و می‌تواند هزینه‌های کود شیمیایی را کاهش دهد (Chen, 2022).

اسید هیومیک و فولویک هر دو محرک‌های رشد طبیعی هستند که از تجزیه مواد آلی خاک حاصل می‌شوند، اما ویژگی‌های متفاوتی دارند. اسید هیومیک با وزن مولکولی بالاتر، عمدتاً بر ساختار خاک، ظرفیت نگهداری آب و تثبیت عناصر غذایی اثر می‌گذارد، در حالی که اسید فولویک با وزن مولکولی پایین‌تر، سریع‌تر جذب گیاه شده و رشد و متابولیسم آن را تحریک می‌کند. در کودهای تجاری حاوی هیومیک، معمولاً مقداری فولویک نیز وجود دارد تا اثرات سینرژیک کوتاه‌مدت و بلندمدت بر رشد ریشه، عملکرد و کیفیت محصول ایجاد شود (Chen, 2022; Keskin et al., 2025; Rose et al., 2014).

علاوه بر افزایش عملکرد کمی، کیفیت محصول چغندرقد، به‌ویژه درصد قند و ویژگی‌های مرتبط با استحصال شکر، نقش تعیین‌کننده‌ای در سودآوری نهایی دارد. در بسیاری از موارد، تیمارهایی که موجب افزایش عملکرد ریشه می‌شوند، لزوماً منجر به بهبود کیفیت تکنولوژیک محصول نمی‌گردند و حتی ممکن است برخی شاخص‌های کیفی را کاهش دهند. از این رو، ارزیابی همزمان صفات کمی و کیفی برای انتخاب تیمار بهینه در مدیریت تغذیه و آبیاری چغندرقد ضروری است. محرک‌های رشد آلی-زیستی، به دلیل اثرگذاری هم‌زمان بر فرآیندهای رشدی، فیزیولوژیکی و متابولیسی، می‌توانند بر این تعادل اثرگذار باشند و نیازمند بررسی جامع‌تری هستند (Rose et al., 2014; Chen, 2022).

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین محدودکننده‌های تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، به شمار می‌رود. کمبود آب موجب کاهش رشد رویشی، اختلال در فتوسنتز، افزایش تنفس، کاهش توسعه ریشه و کاهش عملکرد می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده از راهکارهای مدیریتی مؤثر برای افزایش کارایی مصرف آب و کاهش اثرات منفی خشکی ضروری است.

اسیدهای هیومیک و فولویک با بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید، شرایط بهتری برای رشد ریشه فراهم می‌کنند و ظرفیت فتوسنتزی گیاه را در شرایط تنش حفظ می‌کنند (Naderi et al., 2002; Khan et al., 2012). اسیدهای آمینه نیز با نقش مستقیم در تنظیم پاسخ گیاه به تنش خشکی، عملکرد فتوسنتز و وضعیت آب گیاه را حفظ می‌کنند (Anjum et al., 2014).

شاهد، اسید آمینه، اسید هیومیک و مصرف تلفیقی به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. عامل اصلی شامل دو سطح زمان آبیاری، آبیاری پس از ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس (A) (آبیاری بدون تنش) و آبیاری پس از ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس (A) (آبیاری با تنش) بود که در کرت‌های اصلی اعمال شد (Taha et al., 2011; Lakhawat et al., 2024).

عامل فرعی چهار تیمار تغذیه‌ای شامل شاهد، محلول‌پاشی اسید آمینه، کود آبیاری هیومیک اسید و ترکیب محلول‌پاشی اسید آمینه و کود آبیاری هیومیک اسید (تیمار مصرف تلفیقی) بود که به‌صورت تصادفی در زیرکرت‌های هر کرت اصلی با مساحت ۴۰ مترمربع قرار گرفت. در همه تیمارها، کودهای شیمیایی مطابق آزمون خاک مصرف شد. انتخاب این طرح به دلیل ماهیت عوامل آزمایشی و محدودیت‌های اجرایی صورت گرفت و امکان بررسی اثرات اصلی و متقابل عوامل را فراهم نمود.

ویژگی‌های خاک

انتخاب زمین مناسب بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد تا شرایط یکنواخت و قابل مقایسه برای اجرای آزمایش فراهم شود. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های مرکب خاک از اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر برداشت شده، در هوا خشک و از ال‌ک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شدند (Rhoades, 1982). کربن آلی (OC) با استفاده از روش Walkley-Black تعیین گردید (Nelson & Sommers, 1996). فسفر قابل‌استخراج (P) با روش Olsen و پتاسیم قابل جذب (K) با روش استخراج آمونیوم استات اندازه‌گیری شدند (Olsen & Sommers, 1982; Sparks et al., 1996). عناصر کم‌مصرف شامل آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس (Cu) با جذب اتمی تعیین شدند (Lindsay & Norvell, 1978). کربنات کلسیم معادل (TNV) طبق روش Loepfert & Suarez (۱۹۹۶) اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل (Total N) بر اساس روش Kjeldahl تعیین شد (Bremner, 1960). بافت خاک با روش هیدرومتریک مشخص گردید (Gee & Bauder, 1986). رطوبت نقطه ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از روش فشارسنجی خاک (Pressure Plate) و جرم مخصوص ظاهری خاک (Bulk Density) با روش محاسباتی (نسبت وزن خشک خاک به حجم کل نمونه خاک) تعیین شد. این پارامترها برای

تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب مناسب‌ترین تیمار تغذیه‌ای در شرایط تنش خشکی، به دلیل تضاد بالقوه میان شاخص‌های مختلف عملکرد، کیفیت و وضعیت فیزیولوژیکی گیاه، فرآیندی پیچیده و چندبعدی است. اتکای صرف بر یک یا چند شاخص محدود، نمی‌تواند بازتاب‌دهنده عملکرد واقعی تیمارها در شرایط مزرعه باشد. در این زمینه، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با امکان وزن‌دهی همزمان به شاخص‌های مختلف و مقایسه گزینه‌ها بر اساس نزدیکی به شرایط ایده‌آل، ابزار کارآمدی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری علمی در مدیریت زراعی محسوب می‌شوند (Hwang & Yoon, 1981; Behzadian et al., 2012). با توجه به اهمیت اقتصادی چغندر قند و نقش بالقوه محرک‌های رشد در ارتقای صفات کمی و کیفی، مطالعه حاضر به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی اسیدهای آمینه و کود آبیاری اسید هیومیک بر عملکرد و کیفیت چغندر قند تحت شرایط مختلف آبیاری با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش تاپسیس^۱ (TOPSIS) انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای علمی و عملی برای افزایش عملکرد و کیفیت چغندر قند باشد و کاربرد روش‌های تحلیل چندمعیاره در مدیریت تیمارهای کشاورزی را نشان دهد.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش و طرح آماری

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۲ در ایستگاه تحقیقاتی کمال‌شهر، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، استان البرز اجرا شد. ایستگاه تحقیقاتی در مختصات جغرافیایی ۲۷° ۳۹' شمالی و ۴۵° ۴۷' شرقی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است.

مطالعه حاضر به‌عنوان یک پیش‌آزمون (Pre-test) طراحی شد. هدف آن، ارزیابی عملی بودن طرح، شناسایی چالش‌های اجرایی و گردآوری داده‌های مقدماتی برای اصلاح و بهبود طراحی آزمایش‌های آینده با تکرار بیشتر بود؛ بنابراین، هر چند مدت اجرای طرح یک‌ساله و تکرار محدود (سه تکرار) بود، یافته‌ها به‌عنوان داده‌های اولیه و قابل تفسیر به صورت توصیه‌ای و غیرقطعی ارائه می‌شوند.

داده‌های حاصل از آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده (Split-plot) با سه تکرار و بلوک‌های کامل تصادفی جمع‌آوری شدند. در این طرح، سطوح آبیاری (آبیاری نرمال و تنش خشکی) به‌عنوان عامل اصلی و تیمارهای محرک رشد شامل

¹ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

این مجموعه از اندازه‌گیری‌ها، مشخصات جامع خاک برای اجرای آزمایش و تحلیل اثرات تیمارها را فراهم نمود. برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

محاسبه عمق آب قابل استفاده و مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گرفت، به‌گونه‌ای که حجم آب قابل استفاده در خاک (Available Water Capacity) از تفاضل FC و PWP ضرب در عمق مؤثر ریشه و جرم مخصوص ظاهری خاک به دست آمد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک قطعات مورد آزمایش
Table 1. Some Physical Properties of Soil in the Tested Plots

بافت خاک Soil Texture	جرم مخصوص ظاهری Bulk Density (g/cm ³)	رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) (% w/w)	رطوبت نقطه زراعی (FC) (% w/w)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)
CL	1.55	10.2	21.5	8.3	0.61

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک قطعات مورد آزمایش
Table 2. Some Chemical Properties of Soil in the Tested Plots

کربنات کلسیم معادل TNV (%)	کربن آلی OC (%)	نیتروژن کل N (%)	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn	مس Cu
11.7	1.1	0.22	11.2	285	4.2	4.3	7.6	1.1

زمانی کسر رطوبت خاک، مقدار تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A بود که در واقع تعیین کننده زمان آبیاری بود. معیار کسر رطوبت برای تعیین عمق آب آبیاری، محاسبه کسری رطوبت خاک در زمان آبیاری نسبت به رطوبت نقطه زراعی بود. مدیریت علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها مطابق اصول منطقه انجام شد. برداشت زمانی انجام شد که درصد قند به حداکثر رسید و برگ‌ها سبز متمایل به زرد شدند.

اندازه‌گیری صفات کمی و کیفی چغندر قند

تمام صفات کمی و کیفی مورد بررسی در این مطالعه بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شدند. عملکرد ریشه و وزن غده با جمع‌آوری ریشه‌ها از دو ردیف کشت در هر کرت و محاسبه میانگین آنها به دست آمد (AOAC, 2000). برای ارزیابی کیفی ریشه‌های چغندر قند، از هر کرت به صورت تصادفی تعداد پنج ریشه چغندر قند به صورت تک نمونه انتخاب و نمونه‌برداری شد تا تنوع ظاهری ریشه‌ها در کرت به‌طور مناسب نمایان شود. درصد قند و قند قابل استحصال با استفاده از روش کلرواستیک-پلین اندازه‌گیری شد (ICUMSA, 2011)، در حالی که ملاس با استخراج حرارتی و سنجش قند غیرقابل استحصال تعیین گردید (ICUMSA, 2011). نیتروژن مضره ریشه‌ها از طریق روش کجل‌دال (Kjeldahl) تعیین شد (Bremner, 1960) و پتاسیم و سدیم محلول با آنالیز جذب اتمی اندازه‌گیری گردید (FAO, 2013). کلیات ریشه با اندازه‌گیری pH محلول و محاسبه بر اساس استانداردهای AOAC تعیین شد (AOAC, 2000).

عملیات زراعی

چغندر قند رقم غالب منطقه با توصیه کارشناسان مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند در کرت‌هایی به طول ۱۰ متر و عرض ۴ متر کشت شد، تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار رعایت شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، کود شیمیایی اوره به شکل تقسیط در سه مرحله پس از آبیاری اول (۵۰ کیلوگرم در هکتار)، ۴ تا ۶ برگی (۳۰ تا ۴۰ درصد مقدار کل اوره برآوردی) و مابقی در مرحله رشدی ۸ تا ۱۰ برگی مصرف شد. به منظور جلوگیری از افزایش عیار چغندر قند، از مصرف کود اوره یک هفته قبل از برداشت خودداری شد. همچنین، ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت و همزمان با عملیات آماده‌سازی زمین، مصرف شد. کود آبیاری اسید هیومیک به مقدار ۵ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله ۵ تا ۸ برگی و ۱۶ تا ۱۸ برگی در ابتدای زمین به آب آبیاری اضافه گردید. محلول‌پاشی اسید آمینه نیز به مقدار یک کیلوگرم در هکتار با غلظت پنج در هزار در همان مراحل انجام شد. ترکیبات اشاره شده، همگی از منبع تجاری مورد تأیید مؤسسه تحقیقات خاک و آب بود. اسید هیومیک استفاده شده دارای ۵۲/۹۵ درصد هیومیک اسید و اسید آمینه فاقد نیتروژن معدنی بوده و حاوی ۳۶/۷۹ درصد اسید آمینه آزاد بود. در کل، نیتروژن در ساختار اسیدهای آمینه به صورت آلی و بخشی از گروه آمین یا در زنجیره جانبی برخی اسیدهای آمینه (مانند آرژنین) وجود دارد. آبیاری به روش کرتی انجام شد و کسری رطوبت خاک ناحیه عمق توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متر) با دستگاه TDR پایش شد تا رطوبت خاک بعد از هر آبیاری به ظرفیت زراعی برسد. معیار

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad \text{رابطه (۱)}$$

d_i^+ و d_i^- به ترتیب فاصله گزینه i از ایده‌آل منفی و مثبت است. بدین ترتیب، تیماری که بیشترین نزدیکی را به شرایط ایده‌آل و بیشترین فاصله را از شرایط ضدایده‌آل داشت، به‌عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

منطق وزن‌دهی و جهت معیارها در ماتریس تصمیم

در روش TOPSIS، 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 خشکی یا تیمار محرک رشد را به صورت متعادل ارزیابی می‌کند. معیارهای ماتریس تصمیم در دو جهت مثبت و منفی 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 TOPSIS معکوس یا نرمال‌سازی شدند تا جهت همه معیارها به سمت افزایش مطلوبیت باشد. این کار تضمین می‌کند که شاخص نهایی TOPSIS نشان‌دهنده نزدیکی هر تیمار به راه‌حل ایده‌آل (Ideal solution) باشد و تیماری که بیشترین همخوانی با تمام ویژگی‌های مطلوب داشته باشد، بالاترین امتیاز و رتبه را کسب کند. ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره (جدول ۳ و ۴) بر اساس تیمارهای محرک رشد در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی و با معیارهای مورد ارزیابی شامل عملکرد ریشه، وزن غده، نیتروژن مضره، قلیائیت، درصد ماده خشک خمیر ریشه، قند قابل استحصال و درصد قند خالص تشکیل شد. این معیارها بر اساس اهمیت و اولویت‌های پژوهش انتخاب و در ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره مورد ارزیابی قرار گرفتند تا گزینه‌های مختلف (تیمارهای آبیاری) بر اساس معیارهای تعیین شده ارزیابی و مقایسه شوند.

علاوه بر این، درصد ماده خشک خمیر ریشه از نسبت وزن خشک ریشه به وزن تر ریشه با خشک کردن نمونه‌ها در ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت مشخص شد (AOAC, 2000). تمامی اندازه‌گیری‌ها در شرایط یکسان و با دقت آزمایشگاهی انجام شد تا قابلیت تکرار و اطمینان از صحت داده‌ها تضمین گردد.

تجزیه آماری

پیش از تحلیل داده‌ها، وجود داده‌های پرت با آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف^۲ و نرمال بودن داده‌ها روی باقیمانده‌های مدل با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. سپس تجزیه واریانس (ANOVA) انجام و مقایسه میانگین‌ها در صورت معنی‌دار بودن اثرات با آزمون دانکن در سطوح خطای یک و پنج درصد صورت گرفت. تحلیل‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه 9.4 انجام شد. به منظور رعایت ساختار خطای طرح اسپلیت پلات، از مدل خطی آمیخته (Mixed Model) با رویه PROC MIXED بهره گرفته شد. در این مدل، بلوک و برهمکنش بلوک × آبیاری به‌عنوان اثرات تصادفی و سطوح آبیاری، تیمارهای محرک رشد و اثر متقابل آن‌ها به‌عنوان اثرات ثابت مدل لحاظ شدند. اثر عامل آبیاری بر اساس میانگین مربعات خطای کرت اصلی (Block × Irrigation) و اثر تیمارهای محرک رشد و اثر متقابل آبیاری × تیمار محرک رشد بر اساس خطای کرت فرعی (Residual error) آزمون شد. با توجه به اینکه اثر متقابل 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

به منظور شناسایی تیمار برتر، از تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش تاپسیس (TOPSIS) استفاده شد. این روش امکان مقایسه هم‌زمان چند معیار با واحدهای مختلف را فراهم می‌سازد و با وزن‌دهی بر اساس اهمیت هر معیار، انتخاب بهینه را تسهیل می‌کند (Hwang and yoon, 1981). برای اجرای این روش، داده‌های معیارها ابتدا با استفاده از نرمال‌سازی برداری به مقیاس بدون بعد تبدیل شدند تا مقایسه میان معیارهای مختلف با واحدها و دامنه‌های متفاوت امکان‌پذیر باشد. مقادیر نرمال‌شده سپس وزن‌دهی شده و فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه شد تا رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها انجام گیرد. تیمارها بر اساس شاخص شباهت به ترتیب نزولی رتبه‌بندی شدند. این شاخص با رابطه زیر محاسبه شد:

² Kolmogorov-Smirnov

جدول ۳ - ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره در تحت آبیاری نرمال (بدون تنش)

Table 3. Decision Matrix of Multi-Criteria Analysis under Normal Irrigation (No Stress)

قند خالص Purity (%) (+)	قند قابل استحصال Recoverable sugar (%) (+)	ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%) (+)	قلیائیت Alkalinity (-)	نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp) (-)	وزن ریشه Root weight (kg) (+)	عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) (+)	گزینه‌ها/معیارها Options / Criteria
14.8	10.9	21.8	1.9	5.1	0.93	74.6	شاهد (Control)
15.5	11.5	22.8	1.9	5.0	0.98	78.4	اسید آمینه (Amino acid treatment)
14.2	10.0	21.4	2.0	5.1	1.06	82.7	اسید هیومیک (Humic acid treatment)
12.5	8.3	18.8	2.8	3.8	1.14	84.2	مصرف تلفیقی (Combined treatment)

جدول ۴ - ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره در تحت تنش آبیاری

Table 4. Decision Matrix of Multi-Criteria Analysis under Stress Irrigation

قند خالص Purity (%) (+)	قند قابل استحصال Recoverable sugar (%) (+)	ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%) (+)	قلیائیت Alkalinity (-)	نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp) (-)	وزن ریشه Root weight (kg) (+)	عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹) (+)	گزینه‌ها/معیارها Options / Criteria
15.7	11.4	24.5	1.8	5.9	0.59	51.2	شاهد (Control)
16.0	11.9	23.9	1.7	5.8	0.74	59.3	اسید آمینه (Amino acid treatment)
15.7	11.3	23.2	1.8	5.9	0.82	65.9	اسید هیومیک (Humic acid treatment)
15.9	12.0	23.5	1.5	6.1	0.87	68.4	مصرف تلفیقی (Combined treatment)

نتایج

نتایج تجزیه واریانس آماری

نتایج تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندر قند (جدول ۵) نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری، محرک رشد و برهمکنش آن‌ها بسته به نوع صفت متفاوت بوده است. آبیاری به‌عنوان کورت اصلی، اثر بسیار معنی‌داری (سطح احتمال یک درصد) بر عملکرد ریشه و وزن ریشه داشت که بیانگر نقش تعیین‌کننده تأمین آب در افزایش تولید زیست‌توده و عملکرد نهایی چغندر قند است. همچنین اثر آبیاری بر نیترژن مضره، ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد. این نتایج نشان می‌دهد که تغییر در رژیم آبیاری علاوه بر کمیت تولید، می‌تواند کیفیت ریشه و ترکیبات شیمیایی مرتبط با استخراج قند را نیز تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این، اثر آبیاری بر قلیائیت و قند قابل استحصال در سطح پنج درصد معنی‌دار بود که حاکی از حساسیت این صفات کیفی به شرایط رطوبتی خاک است. در مقابل، اثر آبیاری بر وزن تر خمیر ریشه، وزن خشک خمیر ریشه، پتاسیم، سدیم، قند ملاس و ضریب استحصال معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد این صفات از پایداری نسبی بیشتری نسبت به تغییرات آبیاری برخوردارند.

تحلیل حساسیت نتایج رتبه‌بندی تیمارها نسبت به

وزن معیارها

به منظور بررسی حساسیت نتایج رتبه‌بندی تیمارها در TOPSIS نسبت به وزن معیارها، تحلیل عدم قطعیت وزن‌ها با استفاده از روش مونت‌کارلو انجام شد. در این روش، به جای استفاده از وزن‌های ثابت، در هر تکرار وزن‌ها به صورت تصادفی تولید و به گونه‌ای نرمال‌سازی شدند که مجموع آنها برابر با یک باشد. الگوریتم TOPSIS برای هر مجموعه وزن اجرا شد و رتبه تیمارها ثبت گردید. این فرآیند در ۱۰۰۰۰ تکرار انجام شد تا احتمال کسب رتبه اول برای هر تیمار و توزیع فراوانی رتبه‌ها به دست آید. نتایج حاصل به عنوان تحلیل پایداری (Stability analysis) برای سنجش حساسیت رتبه‌بندی‌ها نسبت به تغییر وزن معیارها مورد استفاده قرار گرفت. تمام محاسبات و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Python و کتابخانه‌های pandas و NumPy انجام شد.

به طوری که آبیاری نرمال با میانگین ۷۹/۹۸ تن در هکتار بیشترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص داد و به طور معنی‌داری نسبت به تیمار تنش خشکی برتری داشت. همچنین وزن ریشه در شرایط آبیاری نرمال به طور معنی‌داری بیشتر از شرایط خشکی بود. اثر آبیاری بر وزن تر خمیر ریشه و وزن خشک خمیر ریشه معنی‌دار نبود که نشان می‌دهد این صفات نسبت به تغییرات رژیم آبیاری حساسیت کمتری داشته‌اند. از نظر صفات شیمیایی، اختلاف معنی‌داری بین سطوح آبیاری برای نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم و قلیائیت مشاهده نشد. در مقابل، ماده خشک خمیر ریشه تحت تأثیر آبیاری قرار گرفت و تیمار تنش خشکی مقدار بیشتری از ماده خشک خمیر ریشه را نسبت به آبیاری نرمال نشان داد. همچنین تفاوت معنی‌داری بین سطوح آبیاری از نظر قند خالص مشاهده شد، به طوری که تیمار خشکی مقدار بیشتری قند خالص تولید کرد. سایر صفات شامل قند ملاس، ضریب استحصال و قند قابل استحصال تحت تأثیر آبیاری قرار نگرفتند.

اثر اصلی محرک‌های رشد بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

بر اساس نتایج (جدول ۷)، تیمارهای محرک رشد اثر معنی‌داری بر عملکرد ریشه و وزن ریشه داشتند. بیشترین عملکرد ریشه مربوط به تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد و پس از آن اسید هیومیک بود، در حالی که کمترین عملکرد به تیمار شاهد اختصاص داشت. وزن ریشه نیز در تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین مقدار و در تیمار شاهد کمترین مقدار را نشان داد. اثر محرک‌های رشد بر وزن تر خمیر ریشه و وزن خشک خمیر ریشه محدود بوده و فقط در برخی تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده شد. از نظر صفات کیفی شامل نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم و قلیائیت، اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای محرک رشد مشاهده نشد. ماده خشک خمیر ریشه تحت تأثیر تیمارهای محرک رشد قرار گرفت، به طوری که کمترین مقدار آن در تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد مشاهده شد. تیمارهای محرک رشد تأثیر معنی‌داری بر قند ملاس، ضریب استحصال و قند قابل استحصال نداشتند. با این حال، از نظر قند خالص، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها مشاهده شد و تیمار اسید آمینه بیشترین مقدار قند خالص را به خود اختصاص داد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بود.

اثر تیمارهای محرک رشد (کرت فرعی) بر عملکرد ریشه و وزن ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود که بیانگر تأثیر مثبت این ترکیبات بر رشد و توسعه ریشه چغندر قند بود. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های رشد می‌تواند از طریق بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی و افزایش رشد رویشی، موجب افزایش عملکرد شود. با این حال، اثر محرک‌های رشد بر اغلب صفات کیفی شامل نیتروژن مضره، پتاسیم، سدیم، قلیائیت، ماده خشک خمیر ریشه، قند ملاس، ضریب استحصال، قند قابل استحصال و قند خالص معنی‌دار نبود. این موضوع بیانگر آن است که محرک‌های رشد در شرایط این آزمایش، بیش از آن که موجب تغییرات شیمیایی در ترکیب ریشه شوند، نقش خود را در افزایش کمیت تولید ایفا کرده‌اند.

برهمکنش آبیاری و محرک رشد تنها بر وزن ریشه در سطح یک درصد و بر وزن تر خمیر ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، در حالی که برای سایر صفات اثر متقابل معنی‌داری مشاهده نشد. معنی‌دار بودن این برهمکنش نشان می‌دهد که واکنش ریشه چغندر قند از نظر تجمع ماده تر به تیمارهای محرک رشد، تحت شرایط مختلف رطوبتی متفاوت است. عدم معنی‌داری اثر متقابل برای اغلب صفات بیانگر آن است که پاسخ این صفات به محرک‌های رشد در دو شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی الگوی نسبتاً مشابهی داشته و اثر محرک‌ها مستقل از شرایط آبیاری بوده است.

مقادیر ضریب تغییرات (CV) برای صفات مختلف در دامنه قابل قبول قرار داشت و کمترین مقدار آن مربوط به عملکرد ریشه بود که نشان‌دهنده دقت مناسب آزمایش و یکنواختی شرایط اجرایی است. این امر اعتبار نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس را تأیید می‌کند. به طور کلی، نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که آبیاری مهم‌ترین عامل مؤثر بر عملکرد و برخی صفات کیفی چغندر قند بوده است، در حالی که محرک‌های رشد عمدتاً با افزایش رشد و عملکرد ریشه نقش اصلاح‌کننده ایفا کرده‌اند. همچنین، محدود بودن اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بیانگر آن است که اثر محرک‌ها در بیشتر صفات مستقل از شرایط رطوبتی بوده است.

اثر اصلی آبیاری بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

نتایج (جدول ۶) نشان داد که سطوح مختلف آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد ریشه و وزن ریشه چغندر قند داشت.

جدول ۵ - تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برخی خصوصیات کمی و کیفی چغندر قند
 Table 5. Analysis of Variance (Mean Squares) of Some Quantitative and Qualitative Traits of Sugar Beet

قند خالص Purity	قند قابل استحصال Recoverable sugar	ضریب استحصال Extraction coefficient	قند ملاس Molasses sugar	ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter	قلیائیت Alkalinity	سدیم Na	پتاسیم K	نیترोजن مضره Reducing nitrogen	وزن تر خمیر ریشه Fresh weight of root pulp	وزن خشک خمیر ریشه Dry weight of root pulp	وزن ریشه Root weight	عملکرد ریشه Root yield	درجه آزادی Degrees of freedom (df)	منابع تغییر Source of variation
0.2 ^{ns}	0.46 ^{ns}	6.52 ^{ns}	0.1 ^{ns}	1.2 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.53 ^{ns}	0.09 ^{ns}	2.11 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.003 ^{**}	13.27 ^{ns}	2	بلوک Block
14.49 ^{**}	13.01 [*]	40.64 ^{ns}	0.04 ^{ns}	39.99 ^{**}	1.43 [*]	0.34 ^{ns}	0.59 ^{ns}	7.9 ^{**}	1.51 ^{ns}	0.56 ^{ns}	0.440 ^{**}	2120.64 ^{**}	1	آبیاری (کرت اصلی) Irrigation (main plot)
0.83	1.07	9.74	0.12	1.24	0.25	0.56	0.16	0.90	3.16	0.18	0.00	0.28	2	خطای آبیاری (بلوک در آبیاری) خطای آبیاری (بلوک در آبیاری)
2.62 ^{ns}	2.72 ^{ns}	15.2 ^{ns}	0.06 ^{ns}	3.24 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.44 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.48 ^{ns}	3.28 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.067 ^{**}	216.82 ^{**}	3	محرک رشد (کرت فرعی) Growth stimulator (sub-plot)
2.52 ^{ns}	3.57 ^{ns}	30.85 ^{ns}	0.12 ^{ns}	3.63 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.38 ^{ns}	0.83 ^{ns}	6.58 [*]	0.12 ^{ns}	0.0035 ^{**}	17.59 ^{ns}	3	آبیاری × محرک رشد Irrigation × Growth stimulator
1.2	1.68	18.43	0.26	1.86	0.15	0.82	0.43	0.45	1.53	0.12	0.0002	5.28	12	خطای کل Total error
7.27	11.9	5.96	14.4	6.06	20.8	19.6	12.5	12.5	7.95	10.03	1.69	3.26	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)

ns, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری، اثر معنی‌دار در سطح پنج درصد و در سطح یک درصد می‌باشد.

ns, * and ** indicate non-significant, significant at 5%, and significant at 1% levels, respectively.

جدول ۶ - مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای آبیاری برای صفات معنی‌دار

Table 6. Comparison of means of main effects of irrigation treatments for significant traits

قند خالص Purity (%)	قند قابل استحصال Recoverable sugar (%)	ماده خشک خمیر ریشه Root pulp dry matter (%)	قلیائیت Alkalinity (%)	نیترژن مضره Reducing nitrogen (mmol per 100 g root pulp)	وزن تر ریشه Root weight (kg)	عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹)	سطوح آبیاری Irrigation levels
14.3 ^b	10.2 ^b	21.2 ^b	2.2 ^a	4.7 ^b	1.03 ^a	79.98 ^a	نرمال (Normal)
15.8 ^a	11.8 ^a	23.8 ^a	1.7 ^b	5.9 ^a	0.76 ^b	61.2 ^b	خشکی (Drought)

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

جدول ۷ - مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای محرک رشد برای صفات معنی‌دار

Table 7. Comparison of means of main effects of growth stimulant treatments for significant traits

وزن ریشه Root weight (kg)	عملکرد ریشه Root yield (t ha ⁻¹)	محرک های رشد Growth stimulators
0.76 ^d	62.9 ^c	شاهد (Control)
0.86 ^c	68.9 ^b	اسید آمینه (Amino acid treatment)
0.94 ^b	74.3 ^a	اسید هیومیک (Humic acid treatment)
1.01 ^a	76.3 ^a	مصرف تلفیقی (Combined treatment)

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر صفات کمی و کیفی چغندر قند

نسبت به شاهد نشان دادند. بیشترین وزن ریشه در شرایط آبیاری نرمال با مصرف تلفیقی محرک رشد مشاهده شد. اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر وزن تر خمیر ریشه هم معنی‌دار بود و در شرایط آبیاری نرمال تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد رتبه اول و در شرایط تنش خشکی تیمار شاهد بالاترین رتبه را کسب کرد.

نتایج (جدول ۸) نشان داد وزن ریشه تحت تأثیر برهمکنش آبیاری و محرک رشد قرار گرفت، به طوری که در هر دو سطح آبیاری، تیمارهای دارای محرک رشد مقادیر بیشتری

جدول ۸ - مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری در محرک رشد برای صفات معنی‌دار

Table 8. Comparison of means of the interaction effects of irrigation and growth stimulants for significant traits

وزن تر خمیر ریشه Fresh weight of root pulp (g)	وزن ریشه Root weight (kg)	تیمار Treatment	سطوح آبیاری Irrigation levels
15.7 ^{ab}	0.93 ^d	شاهد (Control)	نرمال (Normal)
13.9 ^b	0.98 ^c	اسید آمینه (Amino acid treatment)	
16.1 ^{ab}	1.06 ^b	اسید هیومیک (Humic acid treatment)	
17.4 ^a	1.14 ^a	مصرف تلفیقی (Combined treatment)	
16.7 ^a	0.59 ^d	شاهد (Control)	خشکی (Drought)
15.1 ^{ab}	0.74 ^c	اسید آمینه (Amino acid treatment)	
15.3 ^{ab}	0.82 ^b	اسید هیومیک (Humic acid treatment)	
14.0 ^b	0.87 ^a	مصرف تلفیقی (Combined treatment)	

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون دانکن تفاوت آماری معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means sharing the same statistical letters are not significantly different according to Duncan's test.

حجم آب مصرفی

بین آبیاری‌ها حدود هشت روز برآورد شد که این الگو از نظر مدیریتی نزدیک به شرایط آبیاری نرمال بوده و امکان تأمین پیوسته آب مورد نیاز گیاه را فراهم می‌کند. تعداد دفعات آبیاری در این سطح نسبتاً بالا (۲۴ نوبت) بود، اما به دلیل عمق کمتر هر نوبت آبیاری، این روش از نظر عملی برای مدیریت دقیق رطوبت خاک و کاهش نوسانات تنش آبی در ناحیه ریشه مناسب ارزیابی شد. با این برنامه مدیریت آبیاری، مجموع حجم آب مصرفی ۹۸۴۰ مترمکعب در هکتار اندازه‌گیری شد.

بر اساس جدول مقایسه‌ای سطوح آبیاری (جدول ۹)، نتایج نشان داد که افزایش آستانه تبخیر تجمعی از میانگین سطح ۷۵ میلی‌متر به ۱۳۵ میلی‌متر، منجر به تغییر معنی‌دار در الگوی آبیاری از نظر فاصله بین آبیاری، حجم آب مصرفی در هر نوبت و تعداد دفعات آبیاری در طول دوره رشد ۱۸۰ روزه شد. در برنامه آبیاری بر اساس ۸۰-۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A، میانگین عمق آب آبیاری برابر با ۴۱ میلی‌متر و فاصله

جدول ۹ - برنامه آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری

Table 9. Irrigation schedule for different irrigation treatments

حجم آب مصرفی کل Total irrigation amount (m ³ ha ⁻¹)	تعداد دفعات آبیاری (کل دوره رشد) Number of irrigations (entire growth period)	میانگین فاصله بین هر آبیاری Average interval between irrigations (days)	میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت Average irrigation amount per event (m ³ ha ⁻¹)		برنامه آبیاری Irrigation schedule
			نوبت	میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت	
9840	24	8	410	410	آبیاری در شرایط نرمال
8640	16	10-11	540	540	آبیاری در شرایط تنش

هیومیک با امتیاز ۰/۵۷۷ در رتبه سوم قرار گرفت که اختلاف اندک آن با تیمار شاهد بیانگر اثرات مثبت ولی محدود این تیمار در بهبود هم‌زمان عملکرد و کیفیت است. این نتیجه می‌تواند ناشی از وابستگی شدید پاسخ گیاه به دز مصرف و شرایط محیطی در کاربرد اسید هیومیک باشد. در مقابل، تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد با کمترین امتیاز نزدیکی (۰/۳۸) در رتبه چهارم قرار گرفت که نشان‌دهنده فاصله قابل توجه این تیمار از راه‌حل ایده‌آل است. این امر بیانگر آن است که مصرف هم‌زمان محرک‌های رشد در شرایط این پژوهش نتوانسته است بهبود هماهنگ و متعادلی در معیارهای مورد ارزیابی ایجاد کند و حتی در برخی صفات کیفی از جمله افزایش نیتروژن‌های مضره و آلکالیت، اثر منفی بر کیفیت شربت چغندر قند داشته است. به‌طور کلی، نتایج تاپسیس نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش حاضر، کاربرد اسید آمینه به‌عنوان مؤثرترین و متعادل‌ترین تیمار برای بهبود هم‌زمان عملکرد و کیفیت چغندر قند قابل توصیه است، در حالی که تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد نیازمند بازنگری در ترکیب، دز مصرف و زمان کاربرد پیش از توصیه عمومی است.

در مقابل، افزایش تبخیر تجمعی از تشت تبخیر به ۱۴۰-۱۳۰ میلی‌متر، باعث افزایش فاصله بین آبیاری‌ها به حدود ۱۰ تا ۱۱ روز شد که همراه با افزایش عمق آبیاری در هر نوبت به حدود ۵۴ میلی‌متر شد. تعداد دفعات آبیاری و حجم آب مصرفی به ترتیب به ۱۶ نوبت و ۸۶۴۰ مترمکعب در هکتار کاهش یافت. این الگوی آبیاری اگرچه از نظر کاهش دفعات آبیاری و سهولت اجرایی برای مدیریت مزرعه مطلوب‌تر به نظر می‌رسد، اما به دلیل افزایش فاصله بین آبیاری‌ها منجر به بروز تنش خشکی در برخی مراحل حساس رشد چغندر قند شد.

تحلیل چندمعیاره

تحلیل چندمعیاره عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری نرمال (آبیاری بدون تنش)

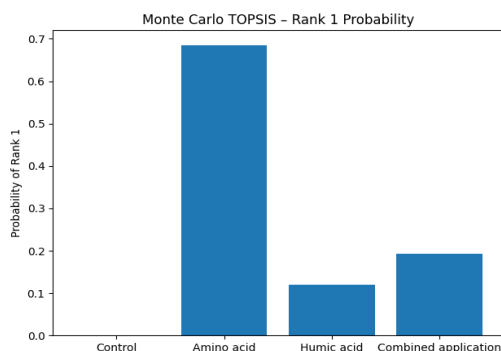
نتایج حاصل از رتبه‌بندی تیمارها به روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (شکل ۱- الف) نشان داد که تیمارهای مورد بررسی از نظر عملکرد و صفات کمی و کیفی چغندر قند دارای تفاوت مشخصی در میزان نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل هستند. بر اساس امتیاز نزدیکی تاپسیس (جدول ۱۰)، تیمار اسید آمینه با کسب بالاترین مقدار (۰/۶۶۱) در رتبه اول قرار گرفت که بیانگر بیشترین شباهت این تیمار به حالت ایده‌آل و کمترین فاصله از بدترین وضعیت در میان تیمارها است. تیمار اسید

جدول ۱۰- رتبه بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با مجموعه معیارهای مختلف با وزن نسبی یکسان
Table 10. Ranking of Growth Stimulator Treatments Using TOPSIS Method with Different Sets of Criteria and Equal Relative Weights

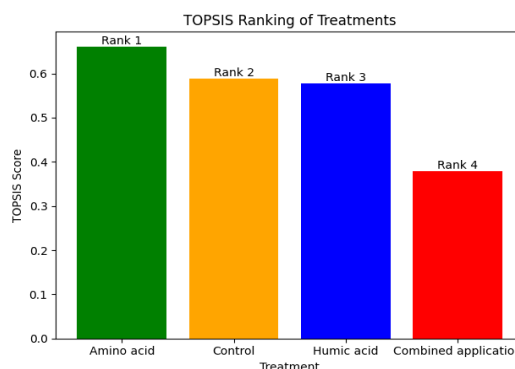
آبیاری نرمال (بدون تنش) Normal irrigation (no stress)	معیارها criteria
رتبه اول: اسید آمینه (0.661) Rank 1: Amino acid treatment (0.661)	عملکرد ریشه، وزن ریشه، نیتروژن مضره، آلكالیتیه، درصد ماده خشک خمیر ریشه، درصد قند قابل استحصال و درصد قند خالص Root yield, Root weight, Reducing nitrogen, Alkalinity, Root pulp dry matter, Recoverable sugar, Purity
رتبه دوم: شاهد (0.588) Rank 2: Control (0.588)	
رتبه سوم: اسید هیومیک (0.577) Rank 3: Humic acid treatment (0.577)	
رتبه چهارم: مصرف تلفیقی محرک رشد (0.380) Rank 4: Combined growth stimulator treatment (0.380)	

شبیه سازی ها توانسته است رتبه اول را نیز کسب کند. این الگو حاکی از حساسیت بالای این تیمار به وزن معیارها و ناپایداری عملکرد آن در شرایط تصمیم گیری نامطمئن است. تیمار اسید هیومیک عمدتاً در رتبه سوم قرار گرفته و تنها در درصد محدودی از شبیه سازی ها رتبه اول را به خود اختصاص داده است که نشان دهنده عملکرد متوسط و نسبتاً پایدار اما فاقد برتری مشخص نسبت به سایر تیمارها است. تیمار شاهد نیز عمدتاً در رتبه های دوم و سوم قرار داشته و در هیچ یک از شبیه سازی ها رتبه اول را کسب نکرده است که بیانگر عدم مزیت رقابتی آن نسبت به تیمارهای محرک رشد است.

نتایج شبیه سازی مونت کارلو مبتنی به منظور تحلیل حساسیت رتبه بندی تیمارها نسب به تغییر وزن معیارها (شکل ۱-ب) نشان داد که رتبه بندی تیمارهای مورد بررسی در برابر عدم قطعیت وزن معیارهای کیفی از پایداری یکسانی برخوردار نیست. بر اساس جدول احتمال رتبه ها، تیمار اسید آمینه با کسب رتبه اول در حدود ۶۹ درصد از کل شبیه سازی ها و عدم حضور در رتبه چهارم، به عنوان پایدارترین و مطمئن ترین گزینه شناسایی شد. این موضوع بیانگر آن است که برتری این تیمار وابستگی اندکی به نحوه وزن دهی معیارها دارد و حتی در شرایط تغییر اولویت معیارهای کیفی، عملکرد آن در سطح مطلوب باقی می ماند. در مقابل، تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین احتمال فرارگیری در رتبه چهارم را نشان داد، اگرچه در بخشی از



(ب)



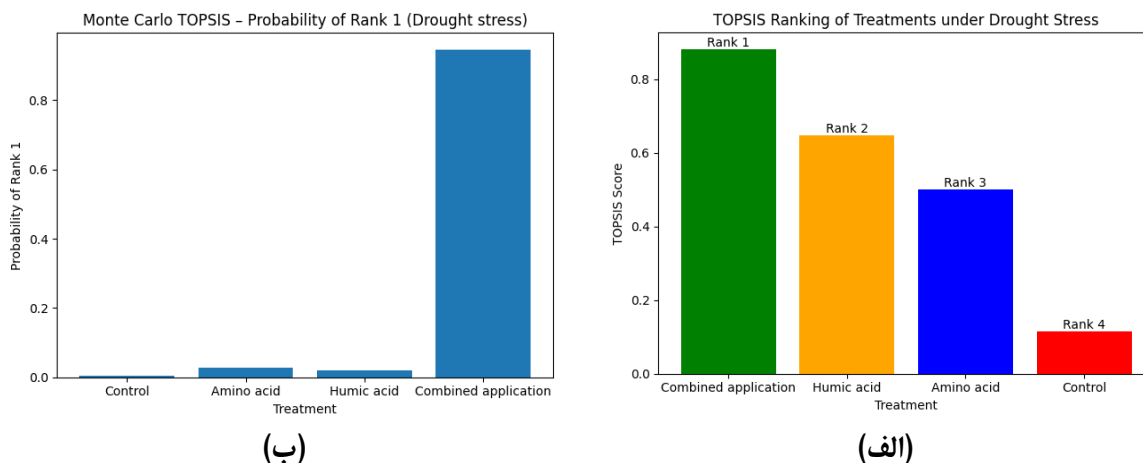
(الف)

شکل ۱- نمودار رتبه بندی و آنالیز حساسیت تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری بدون تنش
Figure 1. Ranking and Sensitivity Analysis of Growth Stimulator Treatments under No-Stress Irrigation Conditions

نمود. نتایج تاپسیس نشان داد که تیمار مصرف تلفیقی محرک رشد بیشترین نزدیکی را به راه‌حل ایده‌آل دارد (جدول ۱۱ و شکل ۲-الف) و این برتری با نتایج مونت کارلو (شکل ۲-ب) نیز به‌طور کامل تأیید شد؛ به‌طوری‌که این تیمار در حدود ۹۵ درصد از سناریوهای وزن‌دهی تصادفی معیارها رتبه اول را به خود اختصاص داد.

تحلیل چندمعیاره عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری با تنش خشکی

در شرایط تنش خشکی، تلفیق نتایج حاصل از رتبه‌بندی قطعی تاپسیس و شبیه‌سازی مونت کارلو امکان تحلیل عمیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری از کارایی تیمارهای محرک رشد فراهم



شکل ۲- نمودار رتبه‌بندی و آنالیز حساسیت تیمارهای محرک رشد در شرایط تنش خشکی

Figure 2. Ranking and Sensitivity Analysis of Growth Stimulator Treatments under Drought Stress Conditions

جدول ۱۱- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با مجموعه معیارهای مختلف با وزن نسبی یکسان

Table 11. Ranking of Growth Stimulator Treatments Using TOPSIS Method with Different Sets of Criteria and Equal Relative Weights

آبیاری با تنش خشکی Drought stress irrigation	معیارها criteria
رتبه اول: مصرف تلفیقی محرک رشد (0.883) Rank 1: Combined growth stimulator treatment (0.883)	عملکرد ریشه، وزن ریشه، نیتروژن مضره، آلکالیت، درصد ماده خشک خمیر ریشه، درصد قند قابل استحصال و درصد قند خالص Root yield, Root weight, Reducing nitrogen, Alkalinity, Root pulp dry matter, Recoverable sugar, Purity
رتبه دوم: اسید هیومیک (0.648) Rank 2: Humic acid treatment (0.648)	
رتبه سوم: اسید آمینه (0.501) Rank 3: Amino acid treatment (0.501)	
رتبه چهارم: شاهد (0.115) Rank 4: Control (0.115)	

دهد که تحت تنش خشکی، تجمع ترکیبات محلول و کاهش محتوای آب به‌عنوان سازوکار تنظیم اسمزی، به حفظ تعادل سلولی کمک می‌کند.

تیمارهای محرک رشد، به‌ویژه مصرف تلفیقی محرک‌ها و اسید هیومیک، موجب افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه و وزن ریشه شدند، در حالی‌که تأثیر آن‌ها بر اغلب صفات کیفی معنی‌دار نبود. این یافته با نتایج Canellas و همکاران (۲۰۲۰) و du Jardin (۲۰۱۵) همراستا است که بیان کردند بیواسیمولانت‌ها عمدتاً از طریق بهبود رشد رویشی، توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش جذب عناصر غذایی عملکرد را افزایش می‌دهند، بدون آنکه تغییرات شدیدی در ترکیب شیمیایی محصول

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی به‌طور معنی‌داری عملکرد ریشه چغندر قند را کاهش داد، در حالی‌که موجب افزایش درصد ماده خشک خمیر ریشه و درصد قند خالص شد. کاهش رشد ریشه تحت تنش خشکی با یافته‌های Hoffmann و همکاران (۲۰۲۰) و Ghaffari و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد؛ آن‌ها کاهش عملکرد را ناشی از محدودیت فتوسنتز، کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه‌های ذخیره‌ای گزارش کرده‌اند. افزایش درصد ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص نیز با نتایج Rašovský و همکاران (۲۰۲۲) و Kenter و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد و نشان می‌دهد که تیمارهای محرک رشد می‌توانند به کاهش تنش خشکی در ریشه‌ها کمک کنند.

مطالعات خارجی نشان داده‌اند که کاربرد ترکیبی بیواستیمولانت‌ها در شرایط خشکی موجب افزایش کارایی فتوسنتز، پایداری غشای سلولی و تجمع مواد فتوسنتزی در محصولات قندی می‌شود (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015). همچنین پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی حاکی از آن است که تیمارهای ترکیبی نسبت به کاربرد منفرد اسیدهای آمینه یا مواد هیومیکی اثر هم‌افزای بیشتری بر عملکرد ریشه و درصد قند خالص دارند (Sadeghi et al., 2016; Rahimi et al., 2019). تیمار اسید هیومیک در رتبه دوم قرار گرفت و به‌طور کلی عملکرد پایدار و قابل قبول داشت، اما شدت اثر آن برای رتبه اول کافی نبود که با یافته‌های پیشین در ایران و جهان همخوانی دارد (Canellas et al., 2015; Motaghi & Nejad, 2014). تیمار اسید آمینه نیز عمدتاً در رتبه سوم قرار گرفت و اثر آن تحت خشکی محدود بود و وابسته به شدت تنش، زمان و روش کاربرد بود (Kowalczyk et al., 2008; Mohammadi et al., 2018).

مقایسه نتایج شرایط آبیاری نشان داد که پاسخ چغندر قند به تیمارهای محرک رشد به‌شدت وابسته به وضعیت رطوبتی خاک است. تحت شرایط بدون تنش، تیمار اسید آمینه پایدار و کم‌ریسک بود، اما در شرایط خشکی، تیمار مصرف تلفیقی عملکرد و پایداری بالاتری داشت. این یافته با گزارش‌های مشابه همخوانی دارد که بیان می‌کنند ترکیب بیواستیمولانت‌ها در شرایط تنش محیطی اثرات بهتری نسبت به مصرف منفرد آن‌ها دارد، زیرا گیاه برای سازگاری نیازمند فعال‌سازی همزمان مسیرهای فیزیولوژیکی متعددی است (Rouphael & Colla, 2020; Ebrahimian et al., 2019).

با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که رتبه‌بندی تیمارها بر اساس TOPSIS گاهی با نتایج آزمون ANOVA همخوانی کامل ندارد. این اختلاف ناشی از ماهیت متفاوت این دو روش است؛ ANOVA تأثیر هر تیمار را بر یک صفت در سطح میانگین و مستقل از سایر صفات بررسی می‌کند، در حالی که TOPSIS با در نظر گرفتن چندین معیار همزمان و نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، رتبه‌بندی کلی عملکرد و کیفیت را ارائه می‌دهد؛ بنابراین، یک تیمار ممکن است از نظر یک صفت مشخص در ANOVA تفاوت معنی‌دار نشان ندهد، اما با توجه به اثر همزمان بر مجموعه‌ای از معیارهای کمی و کیفی، در TOPSIS عملکرد بالاتری داشته باشد. این موضوع نشان می‌دهد که TOPSIS توانایی ادغام و وزن‌دهی چندمعیاره صفات را دارد و می‌تواند گزینه‌های پایدار و بهینه در شرایط واقعی مزرعه را شناسایی کند، در حالی که ANOVA بیشتر محدود به بررسی اثر تک‌بعدی هر صفت است. این تفاوت تأکید می‌کند که تحلیل چندمعیاره مکمل

ایجاد کنند. اثر مثبت اسید هیومیک و مصرف ترکیبی، مشابه نتایج Rahimi و همکاران (۲۰۲۰) و El-Hassanin و همکاران (۲۰۱۶)، نشان‌دهنده نقش افزایش فعالیت ریشه، بهبود دسترسی به عناصر غذایی و افزایش کارایی مصرف آب در افزایش عملکرد است.

نتایج نشان داد که اثر متقابل آبیاری و محرک رشد بر وزن ریشه و وزن تر خمیر ریشه معنی‌دار است؛ این موضوع بیانگر آن است که کارایی محرک‌های رشد به شرایط رطوبتی خاک وابسته است، همان‌طور که Colla و Rouphael (۲۰۲۰) گزارش کردند. تحت تنش خشکی، برتری تیمارهای دارای محرک رشد نسبت به شاهد، نقش این ترکیبات در کاهش اثرات منفی خشکی را نشان داد؛ این موضوع با یافته‌های Bulgari و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد که نشان دادند بیواستیمولانت‌ها با افزایش فعالیت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، بهبود وضعیت آب گیاه و تجمع اُسمولیت‌ها، تحمل گیاهان به خشکی را افزایش می‌دهند. عدم تأثیر معنی‌دار بر برخی صفات کیفی مانند قند ملاس و ضریب استحصال نیز با گزارش Khan و همکاران (۲۰۲۱) همراستا است و نشان می‌دهد افزایش عملکرد ممکن است با رقیق شدن نسبی برخی ترکیبات کیفی همراه باشد.

از دیدگاه فیزیولوژیک، پایداری بالای تیمار اسید آمینه به اثرات مستقیم آن در بهبود فتوسنتز، جذب عناصر غذایی، تنظیم تعادل اسمزی و کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی نسبت داده می‌شود (Calvo et al., 2014; du Jardin, 2015; Heidari et al., 2017). اسید هیومیک نیز توسعه سیستم ریشه‌ای، جذب عناصر غذایی و خصوصیات خاک را بهبود می‌بخشد (Nardi et al., 2002; Canellas et al., 2015). اگرچه شدت اثر آن وابسته به دز مصرف، روش کاربرد و شرایط محیطی است؛ این موضوع می‌تواند دلیل ناپایداری نسبی عملکرد تیمار اسید هیومیک در تحلیل مونت کارلو باشد.

تحلیل مونت کارلو نشان داد که تیمار اسید آمینه گزینه‌ای پایدار و کم‌ریسک برای شرایط مختلف زراعی است، در حالی که تیمار مصرف تلفیقی با حساسیت بالا نسبت به شرایط محیطی و وزن معیارها، نیازمند ارزیابی دقیق‌تر و آزمون‌های محلی است. هم‌راستایی بین نتایج آماری کلاسیک و احتمالاتی نشان داد که برتری تیمار مصرف تلفیقی تحت تنش خشکی نه به دلیل یک صفت خاص، بلکه ناشی از بهبود همزمان مجموعه‌ای از صفات کمی و کیفی است. این برتری می‌تواند از فعال‌سازی همزمان مسیرهای سازگاری گیاه ناشی شود؛ شامل توسعه سیستم ریشه‌ای، افزایش کارایی جذب آب و عناصر غذایی، تنظیم تعادل اسمزی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی که اثرات منفی خشکی بر سنتز و انتقال قند را کاهش می‌دهند.

تحلیل کلاسیک آماری است و می‌تواند تصمیم‌گیری مدیریتی دقیق‌تری در انتخاب تیمارهای مؤثر ارائه دهد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌عنوان یک پیش‌آزمون، تأثیر محرک‌های رشد بر عملکرد و کیفیت چغندر قند در شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی را بررسی کرد. نتایج مقدماتی نشان داد که تنش خشکی می‌تواند مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد و وزن ریشه باشد، اگرچه ممکن است درصد ماده خشک خمیر ریشه و قند خالص ریشه افزایش یابد. محرک‌های رشد عمدتاً بر صفات کمی تأثیر داشته و به‌نظر می‌رسد که بتوانند اثرات منفی خشکی را تا حدی کاهش دهند. تحلیل چندمعیاره و شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید آمینه و در شرایط تنش خشکی، مصرف تلفیقی محرک‌های رشد، گزینه‌های نسبتاً پایدار و کم‌ریسک به‌نظر می‌رسند. با این حال، این نتایج مقدماتی بوده و باید با احتیاط تفسیر شوند. برای ارائه توصیه‌های مدیریتی

مطمئن، نیاز به اجرای آزمون‌های گسترده‌تر با تکرارهای بیشتر، ارزیابی سال‌های متوالی و بررسی شاخص‌های فیزیولوژیک و اقتصادی وجود دارد. یافته‌های این پیش‌آزمون می‌تواند به‌عنوان راهنمای اولیه برای طراحی مطالعات آینده و بررسی استراتژی‌های بالقوه مدیریت محرک‌های رشد در تولید چغندر قند در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد، ولی توصیه‌های عملی باید تنها پس از تأیید نتایج در مطالعات تکمیلی مطرح شوند.

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 تحقیقاتی کمال شهر کرج به‌دلیل همکاری در اجرای این آزمایش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

References

- Ampong, K., Thilakaranthna, M. S., and Gorim, L. Y. 2022. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health. *Frontiers in Agronomy*, 4, 848621. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621>.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., and Lei, W. 2014. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 2026–2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1674>.
- AOAC. 2000. *Official methods of analysis of AOAC International* (17th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., and Ignatius, J. 2012. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39, 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>.
- Bremner, J. M. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *Journal of Agricultural Science*, 55(1), 11–33. <https://doi.org/10.1017/S0021859600021579>
- Bulgari, R., Franzoni, G., and Ferrante, A. 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Scientia Horticulturae*, 243, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.054>.
- Calvo, P., Nelson, L., and Kloepper, J. W. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Dias, M. C., and Jones, D. L. 2020. Biostimulants: Mechanisms and applications in plant nutrition and growth. *Scientia Horticulturae*, 270, 109408. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109408>.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P., and 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>.
- Chen, Q. 2022. Humic acid modulates growth, photosynthesis, hormone and osmolytes system of maize under drought conditions. *Agricultural Water Management*, 263, 107447. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107447>.
- 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>.
- Ebrahimian, E., Bybordi, A., and Seyed Sharifi, R. 2019. Effects of biostimulants on yield and quality of sugar beet under water deficit conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42, 2263–2275. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659314>.
- El-Hassanin, A. A., Abdelhamid, M. T., and El-Nemr, M. A. 2016. Influence of humic acid application on growth, yield and water use efficiency of sugar beet under field conditions. *International Journal of Plant & Soil Science*, 11, 1–11. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/26147>.
- FAO. 2013. *Manual on the use of atomic absorption spectrophotometry for soil and plant analysis*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2021. *FAOSTAT database on harvested area and production of sugar beet*. FAO. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (2nd ed., pp. 383–411). American Society of Agronomy.
- Ghaffari, H., Rahimi, A., and Shirani Rad, A. H. 2022. Effects of drought stress on yield, quality and physiological traits of sugar beet. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24, 789–802.
- Heidari, M., Ghasemi, A., and Sharifi, R. 2017. Effect of amino acid application on yield and quality of sugar beet. *Iranian Journal of Agronomy Sciences*, 48, 215–227. (In Persian)
- Hoffmann, C. M., Huijbregts, T., van Swaaij, N., and Jansen, R. 2020. Impact

- of drought stress on growth, yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy*, 120, 126140.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126140>.
20. Hwang, C.-L., & Yoon, K. 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-Art Survey*. Springer-Verlag.
 21. ICUMSA. 2011. *Methods Book: International methods of sugar analysis* (7th ed.). International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis.
 22. Kenter, C., Hoffmann, C. M., and Märlander, B. 2019. Effects of weather variables on sugar beet yield and quality parameters. *European Journal of Agronomy*, 103, 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.11.002>.
 23. Keskin, B., Akhoundnejad, Y., Dasgan, H. Y., and Gruda, N. S. 2025. Fulvic acid, amino acids, and vermicompost enhanced yield and improved nutrient profile of soilless iceberg lettuce. *Plants*, 14, 609.
<https://doi.org/10.3390/plants14040609>.
 24. Khan, N. A., Nazar, R., and Iqbal, N. 2012. Amino acids as regulators of plant responses to stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 50, 25–36.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.09.010>.
 25. Khan, W., Prithviraj, B., and Smith, D. L. 2021. Biostimulants in crop production: Impacts on yield, quality and physiological responses under stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 1234–1248.
<https://doi.org/10.1007/s00344-020-10123-7>.
 26. Kowalczyk, K., Zielony, T., and Gajewski, M. 2008. Effect of aminoplant and asahi on yield and quality of lettuce grown on rockwool. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 69, 37–45.
 27. Lakhawat, S. S., Sharma, V., Singh, T., Patil, P., Priyadevi, S., and 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, 69–73.
<https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2306>.
 28. Levitt, J. 1980. *Responses of plants to environmental stresses. Vol. 2: Water, radiation, salt, and other stresses*. New York: Academic Press.
 29. Lindsay, W. L., and 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>.
 30. Loeppert, R. H., and Suarez, D. L. 1996. Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 437–474). Madison: SSSA and ASA.
 31. Mohammadi, A., Habibi, D., Vazan, S., and Mohammadi, S. 2018. Effect of amino acid application on yield and physiological traits of sugar beet under drought stress. *Iranian Journal of Agronomy Sciences*, 20, 145–158. (In Persian)
 32. Motaghi, S., and Nejad, T. S. 2014. The effect of different levels of humic acid on growth and yield of sugar beet. *International Journal of Biosciences*, 5, 61–68.
 33. Naderi, R., Schmidhalter, U., and Tavakol, E. 2002. Effects of humic substances on nutrient uptake and growth in sugar beet. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 2291–2303.
<https://doi.org/10.1081/PLN-120014209>.
 34. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., and Vianello, A. 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1527–1536.
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8).
 35. Nelson, D. W., and 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: SSSA and ASA.
 36. Olsen, S. R., and Sommers, L. E. 1982. Phosphorus. In A. L. Page et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 403–430). Madison: ASA and SSSA.
 37. Rahimi, A., Madani, H., and Shirani Rad, A. H. 2019. Yield and quality response of sugar beet to biostimulants under limited irrigation. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21, 1503–1515.
 38. Rahimi, A., Madani, H., and Shirani Rad, A. H. 2020. Effects of humic substances and biostimulants on growth, yield and quality of sugar beet under

- field conditions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22, 1123–1135.
39. Rašovský, M., Pulkrábek, J., Urban, J., and Zima, J. 2022. Effects of drought stress on sugar beet yield and technological quality. *Sugar Tech*, 24, 1123–1133.
<https://doi.org/10.1007/s12355-021-01051-6>.
40. Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 167–179). Madison: ASA and SSSA.
41. Rose, M. T., Patti, A. F., Little, K. R., Brown, A. L., Jackson, W. R., and Cavagnaro, T. R. 2014. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: Practical implications for agriculture. *Advances in Agronomy*, 124, 37–89.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00002-4>.
42. Roupheal, Y., and Colla, G. 2020. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>.
43. Sadeghi, H., Khazaei, H. R., and Kafi, M. 2016. Effect of humic substances and amino acids on quantitative and qualitative traits of sugar beet. *Journal of Sugar Beet Research*, 53, 123–137. (In Persian)
44. Sparkes, D. 2017. Sugar beet. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (2nd ed.). Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/sugar-beet>
45. Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., and Loepfert, R. H. 1996. *Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
46. Taha, A. A., Ibrahim, M. A. M., and 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, 203–212.