

Multi-Criteria Analysis of Allowable Soil Moisture Depletion Coefficients in Sugar Beet Irrigation Management: Linking Functional, Technical, and Economic Criteria

R. Mohammadikia^{1*}

1- On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: rmswri@gmail.com)

Received: 04 May 2026

Revised: 23 June 2026

Accepted: 14 July 2026

Available Online: 14 July 2026

How to cite this article:

Mohammadikia, R. (2026). Multi-criteria analysis of allowable soil moisture depletion coefficients in sugar beet irrigation management: Linking functional, technical, and economic criteria. *Journal of Water and Soil*, 40(1), 39-55. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98569.1538>

Introduction

Water scarcity, as one of the main challenges in the agricultural sector, especially in arid and semi-arid regions, has doubled the necessity of optimizing water use in the production of strategic crops such as sugar beet. Determining an optimal irrigation pattern that can simultaneously meet performance, technical, and economic objectives requires a comprehensive and multi-dimensional approach. Traditional evaluation methods, which often focus on one or a limited number of indicators, are unable to provide a complete picture of the trade-offs between different criteria. In this regard, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods, with their capability to simultaneously and compromisingly evaluate quantitative and qualitative indicators, are considered effective tools for prioritizing management options. This research aimed to evaluate the effects of different levels of management allowable depletion (MAD) on functional, technical, and economic indicators in a sugar beet irrigation system. Given water resource limitations and the need to optimize agricultural water use, determining the appropriate MAD level can significantly enhance crop productivity and profitability. The study employed the VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) multi-criteria decision-making method to select the best irrigation treatment. This investigation was conducted within the context of increasing global water scarcity and the critical need for sustainable agricultural practices. Efficient irrigation management is paramount for ensuring food security and the economic viability of farming operations. By systematically analyzing the trade-offs between water conservation, crop yield, and economic returns under varying soil moisture regimes, this study provides a comprehensive framework for informed decision-making. The application of the VIKOR method is particularly suited to this problem, as it facilitates the identification of a balanced compromise solution that reconciles potentially conflicting objectives inherent in agricultural water management, thereby offering a robust scientific basis for optimizing sugar beet irrigation strategies in water-limited environments.

Materials and Methods

Integrated Methodology Section (Final Version): This experiment employed a randomized complete block design (RCBD) to systematically evaluate the impact of irrigation treatments. The study was conducted at the experimental field of the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran. Three distinct levels of management allowable depletion (MAD), specifically 40%, 60%, and 80%, were applied as the main treatments, each replicated four times to ensure statistical reliability and account for field variability. A comprehensive dataset was collected, encompassing key agronomic and economic indicators: crop evapotranspiration (ETc), root yield, water



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.98569.1538>

productivity (WP), energy productivity, and relevant economic metrics. For the statistical analysis of the data derived from the randomized complete block design, analysis of variance (ANOVA) was utilized. This analysis was conducted to examine the statistical significance of observed differences among the various irrigation treatments for each measured trait. In cases where the treatment effect was significant, Duncan's multiple range test at the 5% probability level was used to separate the means. To assess the reliability of the results and investigate the sensitivity of the final ranking to potential variations in criterion weights or data fluctuations, a sensitivity analysis based on Monte Carlo simulation was also performed. In this analysis, by introducing controlled random variations to the input parameters of the VIKOR model, the stability and robustness of the final ranking of the options were evaluated. The VIKOR multi-criteria decision-making method was subsequently applied to this integrated dataset. This method was chosen for its proven efficacy in handling complex decisions involving conflicting and non-commensurable criteria, allowing for the identification of a compromise ranking that best satisfies all evaluation parameters under the given experimental conditions. The integration of results from the analysis of variance, mean comparison tests, and Monte Carlo sensitivity analysis with the output of the VIKOR method provided a robust and multidimensional analytical framework for deriving valid and applicable conclusions.

Results and Discussion

The results demonstrated that the MAD=60% (T2) treatment optimally balanced root yield, WP, energy productivity, and benefit-cost ratio, emerging as the superior option. In the first year, this treatment achieved a VIKOR index ($Q=0.2971$), a root yield of 36.35 t/ha, and a WP of 5.07 kg/m³. In the second year, it recorded a VIKOR index ($Q=0.1463$), a root yield of 45.4 t/ha, and a WP of 5.8 kg/m³, confirming its superiority. To ensure the reliability of the results, a Monte Carlo sensitivity analysis was performed. This analysis confirmed the stability of the MAD=60% treatment, with probabilities of 85.94% (first year) and 100% (second year). These findings indicate that MAD=60% performs consistently under varying conditions.

Conclusion

The study concludes that MAD=60% is the optimal irrigation strategy for sugar beet cultivation under normal water resource conditions, excelling in functional, technical, and economic performance. These findings can guide farmers and policymakers in improving water management and crop efficiency.

Acknowledgments

The authors would like to thank the staff of the Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran, for their assistance in fieldwork and data collection.

Keywords: Decision matrix, Moisture stress, Monte Carlo method, Sensitivity analysis, Water resources management

تحلیل چندمعیاره ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک در مدیریت آبیاری چغندرقد: پیوند معیارهای عملکردی، فنی و اقتصادی

رضا محمدی کیا^{*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

چکیده

کمبود آب به عنوان یکی از چالش‌های اصلی در بخش کشاورزی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، ضرورت بهینه سازی مصرف آب در تولید محصولات استراتژیک مانند چغندرقد را دوچندان کرده است. تعیین الگوی آبیاری بهینه که بتواند همزمان اهداف عملکردی، فنی و اقتصادی را تأمین کند، نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است. روش‌های سنتی ارزیابی که اغلب بر یک یا چند شاخص محدود متمرکزند، قادر به ارائه تصویری کامل از تبادلات بین معیارهای مختلف نیستند. در این راستا، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با قابلیت در نظرگیری همزمان و سازشی شاخص‌های کمی و کیفی، ابزاری کارآمد برای اولویت‌بندی گزینه‌های مدیریتی محسوب می‌شوند. روش ویکور (VIKOR) به عنوان یکی از روش‌های سازشی معتبر، با محاسبه نزدیکی هر گزینه به راه حل ایده‌آل، امکان انتخاب گزینه‌ای را فراهم می‌کند که بیشترین رضایت گروهی را در بین معیارهای متعارض به ارمغان آورد. بنابراین، پژوهش حاضر با به کارگیری این روش نوین، به ارزیابی تأثیر ضرایب مختلف تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) بر سیستم آبیاری چغندرقد می‌پردازد. این پژوهش طی دو سال زراعی در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور (کرج) انجام شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری بر اساس ضرایب درصد تخلیه مجاز رطوبت خاک ($MAD=40\%$ ، $MAD=60\%$ و $MAD=80\%$) و در چهار تکرار اجرا گردید. داده‌های مربوط به تبخیر-تعرق، عملکرد ریشه، بهره‌وری آب، انرژی و شاخص اقتصادی جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تیمار با ۶۰ درصد تخلیه رطوبت خاک با ایجاد تعادل بهینه بین معیارهای عملکردی (عملکرد ریشه و بهره‌وری آب)، فنی (بهره‌وری انرژی) و اقتصادی (نسبت سود به هزینه)، به عنوان گزینه برتر در شرایط نرمال منابع آب شناسایی شد. در سال اول، این تیمار با شاخص ویکور ($Q=0/2971$) و در سال دوم با شاخص ویکور ($Q=0/1463$) در رتبه اول قرار گرفت. این تیمار در سال اول با عملکرد ۳۶/۳۵ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۵/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب و در سال دوم با عملکرد ۴۵/۴ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۵/۸ کیلوگرم بر متر مکعب، تعادل مناسبی بین معیارهای عملکردی و اقتصادی ایجاد نمود. تحلیل حساسیت با روش مونت کارلو نیز پایداری این برتری را با احتمال ۸۵/۹۴ درصد در سال اول و ۱۰۰٪ درصد در سال دوم تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، تنش رطوبتی، روش مونت کارلو، ماتریس تصمیم، مدیریت منابع آب

مقدمه

آب و انرژی، مدیریت بهینه این منابع به یک چالش اساسی در تولید پایدار محصولات کشاورزی تبدیل شده است. مصرف ناکارآمد آب آبیاری منجر به هدررفت منابع محدود آبی و کاهش پایداری سیستم‌های کشاورزی می‌شود، در حالی که بهره‌وری انرژی پایین نیز هزینه‌های تولید را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی منفی ایجاد

چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات استراتژیک و اقتصادی در کشاورزی ایران و جهان است که نقش مؤثری در تأمین شکر و فرآورده‌های صنعتی دارد. با افزایش جمعیت و محدودیت منابع

۱- گروه مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران
(Email: rmswri@gmail.com)
* - نویسنده مسئول:

نشان می‌دهد که آیا بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی به افزایش منافع مزرعه منجر می‌شود یا صرفاً بهبودهای فنی بدون پشتوانه اقتصادی ایجاد می‌گردد. سودمندی اقتصادی معمولاً از طریق شاخص‌هایی نظیر تغییرات هزینه‌های تولید، میزان درآمد حاصل از عملکرد، و نسبت منافع به هزینه‌ها سنجیده می‌شود. از آنجاکه بسیاری از نهاده‌ها به‌ویژه آب، سوخت پمپ‌ها و نهاده‌های انرژی بر مانند کود بخش مهمی از هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند، کاهش مصرف یا بهینه‌سازی آن‌ها می‌تواند همزمان بهره‌وری منابع و وضعیت مالی تولید را بهبود دهد. بنابراین بررسی همزمان معیارهای بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی می‌تواند تصویر واقع‌بینانه‌تری از اثربخشی تیمارهای مختلف آبیاری ارائه دهد. در همین چارچوب، بهره‌وری انرژی در کنار بهره‌وری آب و سودمندی اقتصادی امکان تحلیل جامع منابع آب و انرژی و تصمیم‌گیری بهینه در مدیریت آبیاری را فراهم می‌کند (Topak et al., 2010a). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق کاهش انرژی ورودی‌های غیرضروری و انتخاب سیستم‌های آبیاری کارآمد، می‌تواند بهره‌وری انرژی را ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش دهد و همزمان اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت و کود را کاهش دهد (Caliskan & Caliskan, 2010; Balta et al., 2021). افزون بر جنبه‌های محیط‌زیست، این بهینه‌سازی‌ها می‌تواند هزینه‌های تولید را نیز کاهش دهند و بدین ترتیب، سودآوری فعالیت کشاورزی را تقویت کنند؛ به همین دلیل، بررسی همزمان شاخص‌های عملکردی، فنی و اقتصادی برای برنامه‌ریزی پایدار و مدیریت منابع ضروری است. پژوهش‌های انجام شده در ایران نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های مختلف آبیاری و مدیریت کود و آب می‌تواند تأثیر چشمگیری بر هر دو شاخص بهره‌وری آب و انرژی داشته باشد (Piri & Mobaraki, 2021). همچنین، تحقیقات بین‌المللی در اروپا و آمریکا نشان می‌دهند که آبیاری قطره‌ای و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری در شرایط مختلف اقلیمی باعث افزایش بهره‌وری آب و انرژی در چغندرقد می‌شود (Smith & Jones, 2010; Yousefi, 2015; El Hamdi et al., 2017a). این یافته‌ها اهمیت بررسی دقیق تیمارهای مختلف آبیاری و تحلیل کمی شاخص‌های عملکردی را برجسته می‌سازد؛ به‌ویژه زمانی که هدف، انتخاب بهترین گزینه از میان چند تیمار با توجه به اثرات همزمان بر منابع و اقتصاد مزرعه باشد. با توجه به اهمیت همزمان بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۳ (MCDM) مانند ویکور^۴ (VIKOR) در تحقیقات کشاورزی و منابع آب بسیار رایج شده است. مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که ویکور و سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در رتبه‌بندی سیستم‌های آبیاری، انتخاب

می‌کند (Seydan & Mansouri, 2019a; Smith & Jones, 2010). افزون بر این، نوسان قیمت نهاده‌ها (از جمله انرژی، کود و آب) و نیز تغییرات بازده اقتصادی تولید، ضرورت توجه همزمان به معیارهای فنی و اقتصادی را دوچندان می‌کند؛ به‌گونه‌ای که دستیابی به تصمیم‌های پایدار در سطح مزرعه، نیازمند ارزیابی توأم عملکرد زیست‌محیطی، کارایی منابع و سودمندی اقتصادی است. در این راستا، بهره‌وری آب^۱ (WP)، به‌عنوان نسبت عملکرد محصول به میزان آب مصرفی، یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی توانایی سیستم‌های تولید در تبدیل آب به محصول به شمار می‌رود و نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب دارد (Seydan & Mansouri, 2019b). مطالعات متعدد داخلی و بین‌المللی نشان داده‌اند که روش‌های مختلف آبیاری، زمان‌بندی و مقدار آبیاری و مدیریت تغذیه آب و کود، تأثیر قابل توجهی بر بهره‌وری آب چغندرقد دارند. به‌عنوان مثال، استفاده از آبیاری قطره‌ای، نه تنها موجب افزایش عملکرد محصول، بلکه کاهش مصرف آب و جلوگیری از هدررفت منابع آبی می‌شود (Nasiri et al., 2014a; Nasiri et al., 2014b; Yousefi, 2015).

همچنین، مطالعات نشان داده‌اند که تنظیم آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه و اعمال کسری آب در مراحل حساس رشد می‌تواند بهره‌وری آب را بهبود بخشد و همزمان اثرات منفی ناشی از تنش‌های آبی را کاهش دهد (Caliskan & Caliskan, 2010; El Hamdi et al., 2017b). تحقیقات بین‌المللی نیز بیانگر آن است که ترکیب آبیاری قطره‌ای با تکنیک‌های مدیریت تغذیه آب و کود، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، موجب افزایش بهره‌وری آب و بهبود کیفیت محصول می‌شود (Balta et al., 2021). این یافته‌ها بر اهمیت طراحی مناسب برنامه آبیاری و انتخاب سیستم بهینه تأکید می‌کنند؛ امری که از منظر اقتصادی نیز می‌تواند با کاهش اتلاف منابع و مدیریت بهتر نهاده‌ها، زمینه افزایش درآمد و بهبود وضعیت اقتصادی تولیدکننده را فراهم کند. از سوی دیگر، بهره‌وری انرژی^۲ (EP) به‌عنوان نسبت انرژی خروجی محصول به مجموع انرژی ورودی‌های مصرف‌شده (شامل انرژی مربوط به کود، بذر، آب آبیاری و ماشین‌آلات)، یکی از معیارهای کلیدی برای سنجش کارایی کلی مصرف انرژی در سیستم‌های کشاورزی است (Arjeh et al., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که چغندرقد نسبت به بسیاری از محصولات دیگر، انرژی بیشتری را به شکل قابل استفاده در محصول بازمی‌گرداند و به همین دلیل می‌تواند شاخص قابل اعتمادی برای ارزیابی عملکرد مدیریتی، اقتصادی و محیط‌زیستی سیستم‌های زراعی باشد (Asgharipour et al., 2012; Yousefi & Mahdavi, 2015; Damghani, 2015). علاوه بر شاخص‌های فنی مانند بهره‌وری آب و انرژی، سودمندی اقتصادی نیز به‌عنوان یک معیار تصمیم‌گیری مهم،

غلظت کاتیون‌ها در محدوده مجاز بود (جدول ۲). نسبت مناسب کلسیم، منیزیم و سدیم، خطر شوری و سدیمی شدن را کاهش داده و از سلامت خاک و رشد گیاه پشتیبانی می‌کند.

طرح آزمایشی

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) با سه تیمار آبیاری و چهار تکرار انجام شد. انتخاب این طرح و تعداد تکرارها بر اساس اصول طراحی آزمایش‌های مزرعه‌ای و به منظور کنترل تغییرات محیطی و افزایش دقت مقایسه تیمارها صورت گرفت. در طرح بلوک‌های کامل تصادفی، تعداد تکرارها مقدار ثابتی نداشته و متناسب با شرایط مزرعه، میزان ناهمگنی محیط و دقت مورد نیاز پژوهش تعیین می‌شود (Petersen, 1994; Hinkelmann & Kempthorne, 2008; Gomez & Gomez, 1984). تیمارهای آبیاری بر اساس ضرایب مختلف حد مجاز تخلیه رطوبت قابل استفاده خاک^۱ (MAD) شامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تعریف شدند.

بهترین تیمارهای کود و آب و مقایسه عملکرد محصولات مؤثر هستند (Mardani et al., 2015a; Wang et al., 2020). همچنین، پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهد که استفاده از ویکور و تحلیل حساسیت می‌تواند به تصمیم‌گیری بهینه و پایدار در مدیریت آبیاری کمک کند (Piri & Mobaraki, 2021). به منظور مدیریت منابع آب و انرژی و نیز ارتقای پیامدهای اقتصادی تولید، این مطالعه با هدف ارزیابی اثر تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری بر بهره‌وری آب، بهره‌وری انرژی و سودمندی اقتصادی در چغندر قند با استفاده از روش تحلیل چندمعیاره انجام شد. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای عملی برای تصمیم‌گیری در مدیریت آبیاری چغندر قند و بهبود کارایی منابع آب و انرژی همراه با افزایش منافع اقتصادی تولیدکننده باشد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش

این پژوهش طی دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۶) در مزرعه‌ی تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در کرج انجام گرفت. این مزرعه در موقعیت جغرافیایی، ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی واقع است. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه از اقلیم گرم و خشک برخوردار است که با تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های سرد مشخص می‌شود (Metekan et al., 2012). داده‌های اقلیمی بلندمدت برای دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهند که دمای بیشینه در تابستان به حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه در زمستان به نزدیک یک درجه سانتی‌گراد می‌رسد، که نوسانات حرارتی قابل توجه منطقه را منعکس می‌کند (Iran Meteorological Organization, 2021).

ویژگی‌های خاک و آب محل پژوهش

نمونه‌های خاک از دو عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر) برداشت شد تا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تعیین شود. لایه سطحی خاک دارای هدایت الکتریکی، کربن آلی و نیتروژن کل بیشتری نسبت به زیرسطح بود، در حالی که فسفر و پتاسیم قابل جذب با افزایش عمق کاهش یافت (جدول ۱). این الگو اهمیت مدیریت لایه‌های سطحی خاک در جذب مواد غذایی و آب را نشان می‌دهد. کیفیت آب آبیاری برای کشت چغندر قند مناسب آب کمتر از حد آستانه ۷ دسی‌زیمنس بر متر برای چغندر قند بود و نشان‌دهنده عدم وجود مشکل شوری در آبیاری این محصول بود (Ayers & Westcot, 1985). آب دارای اسیدیته نزدیک به خنثی، هدایت الکتریکی پایین و

¹ Management Allowable Depletion

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Soil physical and chemical properties

عمق خاک	بافت خاک	پتاسیم (K)	فسفر (P)	نیترژن (N)	کربنات کلسیم معادل CaCO ₃ (%)	ماده آلی (OC)	اسیدیته (pH)	هدایت الکتریکی (EC)	نقطه پژمردگی (PWP)	ظرفیت زراعی (FC)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density
Soil depth (cm)	Soil texture	(ppm)	(ppm)	(%)	(%)	(%)	(pH)	(dS m ⁻¹)	(w/w %)	(w/w %)	(g cm ⁻³)
0-30	Loam	230	7.2	0.06	12	0.55	7.7	0.72	9.5	19.2	1.52
30-60	Loam	220	6.8	0.05	16	0.41	7.8	0.58	8.5	18.8	1.58

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 2- Irrigation water chemical properties

اسیدیته (pH)	نسبت جذب سدیم (SAR)	هدایت الکتریکی (EC)	سولفات SO ₄ ²⁻	کلراید Cl ⁻	بی‌کربنات HCO ₃ ⁻	منیزیم Mg ²⁺	کلسیم Ca ²⁺	سدیم Na ⁺
(pH)	(SAR)	(dS m ⁻¹)	(meq L ⁻¹)	(meq L ⁻¹)	(meq L ⁻¹)	(meq L ⁻¹)	(meq L ⁻¹)	(meq L ⁻¹)
7.5	0.35	0.56	0.6	0.7	3.3	0.2	3.9	0.5

عملیات زراعی

تعیین تبخیر-تعرق چغندر قند در مدیریت‌های مختلف آبیاری

تبخیر-تعرق واقعی چغندر قند (ETa) بر اساس روش ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen et al., 1998) محاسبه شد. در این روش، ابتدا آب قابل استفاده گیاه^۱ (TAW) از اختلاف بین ظرفیت زراعی^۲ (FC) و نقطه پژمردگی دائم^۳ (PWP) در هر متر خاک محاسبه شد:

$$TAW = FC - PWP \quad (1)$$

سپس مقدار آب سهل الوصول^۴ (RAW) بر اساس رابطه زیر تعیین شد:

$$RAW = p * TAW \quad (2)$$

p معادل ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) تیمارهای آبیاری در نظر گرفته شد.

زمان آبیاری

به منظور تعیین زمان آبیاری، رطوبت خاک در طول فصل رشد با استفاده از دستگاه نوترون متر در دو عمق ۳۰-۳۰ و ۶۰-۳۰ سانتی متری اندازه گیری شد. قرائت‌های رطوبتی به طور منظم انجام گرفت و میزان آب قابل استفاده خاک در ناحیه مؤثر ریشه (۰ تا ۶۰ سانتی متر) محاسبه

عملیات خاک‌ورزی، کوددهی و آماده‌سازی مزرعه بر اساس نتایج آزمون خاک و مطابق با توصیه‌های کارشناسی انجام گرفت. پس از آماده‌سازی زمین، هر سال، چغندر قند رقم «شکوفه» در ردیف‌هایی با فاصله ۶۰ سانتی متر و تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار کشت شد. بذرها به صورت متراکم کشت شدند و پس از مرحله جوانه‌زنی، عملیات تنک کردن انجام شد به گونه‌ای که فاصله نهایی بین گیاهان در محدوده ۲۵ تا ۳۵ سانتی متر تنظیم گردید. مقدار بذر مصرفی ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار بود. کودهای پایه شامل فسفر و پتاسیم به میزان توصیه شده بر اساس آزمون خاک و قبل از کاشت به خاک افزوده شد و کود ازته به صورت سرک در مراحل حساس رشد گیاه اعمال گردید. مرحله اول شامل ۴۰ کیلوگرم در هکتار در زمان ۶-۴ برگی برای کمک به رشد رویشی برگ و افزایش فتوسنتز بود. مرحله دوم ۳۰ کیلوگرم در هکتار در زمان ۸-۱۰ برگی برای توسعه ریشه و برگ و مرحله سوم ۳۰ کیلوگرم در هکتار قبل از توسعه کامل ریشه و غده برای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصول داده شد. آبیاری مزرعه به صورت منظم و بر اساس برنامه تعریف شده انجام شد. عملیات کنترل علف‌های هرز، مبارزه با آفات و بیماری‌ها طبق دستورالعمل‌های فنی صورت گرفت تا رشد مطلوب گیاه فراهم گردد. برداشت محصول در زمان رسیدگی کامل انجام شد و سپس برای مراحل بعدی آزمایش‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آماده‌سازی گردید.

3- Permanent Wilting Point

4- Readily Available Water

1- Total Available Water

2- Field Capacity

$$ET_c = I + R - D - \Delta S \quad (۶)$$

که در آن I عمق آب آبیاری (mm)، R بارش (mm)، D زه آب خروجی از لایسیمتر (mm) و ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک در عمق مؤثر ریشه (mm) می باشد.

تغییرات ذخیره رطوبتی خاک بر اساس اختلاف رطوبت حجمی خاک بین ابتدای و انتهای هر دوره و عمق توسعه ریشه محاسبه شد.

$$\Delta S = Z_r (\theta_f - \theta_i) \quad (۷)$$

آبیاری لایسیمتر به صورت دستی و روزانه انجام شد تا رطوبت خاک در محدوده نزدیک به ظرفیت زراعی حفظ شده و از بروز تنش آبی جلوگیری گردد.

با توجه به مدیریت دقیق آبیاری و حفظ رطوبت خاک در شرایط نزدیک به ظرفیت زراعی، تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (ΔS) در اغلب دوره های رشد ناچیز بود. با این حال، به منظور افزایش دقت محاسبات و کاهش اثر نوسانات کوتاه مدت در اجزای بیلان آب، کلیه مؤلفه های معادله بیلان شامل آبیاری، بارش، زه آب خروجی و تغییرات ذخیره رطوبتی خاک به صورت هفتگی جمع و تبخیر-تعرق پتانسیل بر اساس مقیاس زمانی هفتگی محاسبه گردید. این رویکرد موجب کاهش خطای اندازه گیری و افزایش پایداری برآورد تبخیر-تعرق در طول فصل رشد شد.

داده های بارش از ایستگاه هواشناسی مشکین دشت اخذ و در محاسبات لحاظ شد. با توجه به عمق لایسیمتر نسبت به عمق توسعه ریشه، ناحیه زیر ریشه به عنوان مخزن ذخیره هیدرولوژیک عمل کرده و تنها در دوره های آبیاری، زه آب محدودی ایجاد شد که به طور منظم جمع آوری و در بیلان آب منظور گردید.

به منظور تعیین عمق مؤثر ریشه چغندر قند، با فرض عمق نهایی ریشه برابر با ۰/۶ متر، تغییرات توسعه ریشه در طول فصل رشد بر اساس مراحل فنولوژیک گیاه مطابق منابع فائو در نظر گرفته شد (Doorenbos & Kassam, 1979; Allen et al., 1998). بر این اساس، در مرحله ابتدایی رشد عمق مؤثر ریشه برابر با ۳۰ درصد، در مرحله توسعه و میانی رشد برابر با ۶۰ درصد و در مرحله پایانی رشد برابر با ۱۰۰ درصد عمق نهایی فرض گردید. این رویکرد امکان برآورد پویای ظرفیت نگهداری آب در ناحیه توسعه ریشه و محاسبه دقیق تر نیاز آبی گیاه را فراهم نمود.

بهره وری آب

بهره وری آب (WP) عملکرد ریشه و عملکرد قند خالص بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

گردید. در هر تیمار، زمانی که میزان تخلیه رطوبت قابل استفاده خاک به حدود ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد می رسید، آبیاری انجام می شد (Allen et al., 1998; Michael, 2008).

عمق آبیاری و حجم آب آبیاری ناخالص

مقدار آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری بر اساس کسری رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی^۱ (SMD) در عمق مؤثر ریشه از رابطه (۳) به دست آمد:

$$I_n = (FC - \theta) * Z_r \quad (۳)$$

که در آن: I_n عمق خالص آب آبیاری (mm)، FC رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی ($mm\ m^{-1}$)، θ رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری ($mm\ m^{-1}$) و Z_r عمق مؤثر ریشه (m) بود.

حجم ناخالص آب آبیاری، پس از تعیین عمق خالص آبیاری از رابطه آلن و همکاران (Allen et al., 1998)، برای هر تیمار آبیاری بر اساس جبران کامل کسری رطوبت تا رسیدن خاک به سطح ظرفیت زراعی در ناحیه ریشه با استفاده از کنتور حجمی اندازه گیری شد. مطابق روش اجرایی آزمایش، پس از محاسبه عمق خالص آبیاری برای ناحیه ریشه، عملیات آبیاری توسط پمپ شروع شد و جریان آب اعمالی تا زمانی ادامه یافت که عمق آب کاربردی متناظر با نیاز خالص ریشه تأمین گردید. سیستم آبیاری بصورت تیپ (Tape) بود.

زمانی که کسری رطوبت خاک (SMD) در عمق مؤثر ریشه از مقدار آب سهل الوصول (RAW) فراتر رفت، ضریب تنش آبی خاک (K_s) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$K_s = (TAW - Dr) / (TAW - RAW) \quad (۴)$$

در نهایت تبخیر-تعرق واقعی گیاه از رابطه زیر به دست آمد:

$$ET_a = K_s * ET_c \quad (۵)$$

که در آن ET_a تبخیر-تعرق واقعی گیاه، (K_s) ضریب تنش آبی و ET_c تبخیر-تعرق گیاه در شرایط بدون تنش می باشد. این روش امکان ارزیابی اثر سطوح مختلف محدودیت آب بر تبخیر-تعرق واقعی چغندر قند را فراهم کرد (Allen et al., 1998).

تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل چغندر قند در لایسیمتر

تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل چغندر قند (ET_c) با استفاده از لایسیمتر زهکش دار و بر اساس روش بیلان آب انجام شد. پیش از کاشت، لایسیمترها به طور کامل آبیاری و تا حد اشباع رسانده شدند و پس از تخلیه آب اضافی، رطوبت خاک به وضعیت ظرفیت زراعی تنظیم گردید تا شرایط اولیه یکنواخت در تمامی واحدهای آزمایشی ایجاد شود. تبخیر-تعرق گیاه از رابطه بیلان آب زیر محاسبه شد:

¹ Soil Moisture Depletion

نشان‌دهنده کارایی مطلوب سیستم زراعی بود (جدول ۳).
 $EP = E_{out}/E_{in}$ (۱۱)

تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی پژوهش بر اساس نسبت منفعت به هزینه (B/C Ratio) انجام شد. هزینه کل هر تیمار شامل دو بخش اصلی بود: هزینه‌های ثابت کشت (کود، بذر، ماشین‌آلات و نیروی انسانی) به مبلغ ۳۰۰ میلیون ریال در هکتار و هزینه آب مصرفی با نرخ مصوب ۴۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب. درآمد حاصل از فروش ریشه چغندرقد نیز با قیمت تضمینی ۵۲۰۰۰ ریال برای هر کیلوگرم محاسبه گردید. کلیه قیمت‌ها و هزینه‌ها مطابق دستورالعمل‌های رسمی جهاد کشاورزی و تعرفه‌های مصوب سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در نظر گرفته شد.

تجزیه آماری

با توجه به تفاوت‌های شرایط محیطی بین دو سال آزمایش و برای ارزیابی دقیق‌تر اثرپذیری صفات مورد مطالعه از این نوسانات، داده‌های مربوط به هر سال زراعی به‌صورت جداگانه مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. این تصمیم مبتنی بر نتایج اولیه آزمون تجزیه واریانس مرکب بود که وجود اثر متقابل معنی‌دار بین فاکتور سال و تیمارهای آزمایشی را برای صفات نشان داد. تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها نشان داد که از بین سه صفت اصلی مورد بررسی، اثر متقابل سال در تیمار برای تبخیر-تعرق در سطح یک درصد و بهره‌وری آب در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. با توجه به این یافته و همچنین اهمیت ارزیابی پایداری تیمارها در شرایط محیطی متفاوت، تصمیم بر آن شد تا کلیه داده‌ها چه برای صفات دارای اثر متقابل معنی‌دار و چه برای صفات فاقد آن به‌صورت سال به سال ارائه شوند. این رویکرد، یکنواختی در ارائه نتایج را حفظ کرده و امکان مقایسه جامع‌تر الگوی پاسخ گیاه در هر سال را برای خواننده فراهم می‌کند. تجزیه واریانس جداگانه برای هر سال نیز انجام گرفت. محاسبات مربوط به تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار SAS انجام شد.

رتبه‌بندی تیمارها به روش تحلیل چندمعیاره

به‌منظور تکمیل تحلیل آماری و ارائه یک ارزیابی جامع‌تر از عملکرد تیمارهای آبیاری، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور استفاده شد (Opricovic, 1998). این روش‌ها امکان رتبه‌بندی همزمان تیمارها را بر اساس معیارهای مختلف فراهم می‌کند. ماتریس تصمیم (جدول ۴) برای هر سال به‌صورت مستقل و بر اساس میانگین هر تیمار تشکیل شد؛ به‌طوری‌که سطرها بیانگر تیمارها و ستون‌ها معیارهای ماتریس تصمیم بود. معیارها شامل تبخیر-تعرق، عملکرد ریشه، بهره‌وری آب ریشه، بهره‌وری انرژی و ارزش اقتصادی ریشه تولیدی با فرض

$$WP = \frac{Y}{ET_a} \quad (۸)$$

که در آن WP بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، Y عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) و ET_a تبخیر-تعرق واقعی در طول دوره رشد (متر مکعب در هکتار) است (Doorenbos & Kassam, 1979).

بهره‌وری انرژی

به‌منظور ارائه تحلیلی عمومی و مستقل از مدیریت کشاورزان، تحلیل انرژی به ورودی‌های اصلی و کم‌نوسان محدود شد. در این راستا، تنها انرژی آب آبیاری به‌عنوان انرژی ورودی و انرژی عملکرد ریشه به‌عنوان انرژی خروجی تیمارهای آزمایشی در نظر گرفته شد. سایر نهاده‌های انرژی نظیر نیروی انسانی، سوخت، ماشین‌آلات و سموم به‌دلیل وابستگی به مدیریت فردی کشاورزان و ایجاد نوسان، از تحلیل انرژی حذف گردیدند.

انرژی ورودی به سیستم زراعی (E_{in}) از حاصل ضرب حجم آب آبیاری ناخالص در ضریب انرژی آب از رابطه زیر محاسبه گردید (Hatirli et al., 2006):

$$E_{in} = V_i * C_i \quad (۹)$$

که در آن:

E_{in} : انرژی ورودی به سیستم زراعی ($MJ ha^{-1}$)

V_i : حجم آب آبیاری ناخالص ($m^3 ha^{-1}$)

C_i : ضریب انرژی نهاده ($MJ m^{-3}$)

انرژی ورودی برای آب آبیاری، $0.63 MJ m^{-3}$ در نظر گرفته شد که این مقدار بیانگر انرژی مصرفی برای استخراج، پمپاژ و انتقال آب در سیستم‌های آبیاری است (Ozkan et al., 2004; Rafiee et al., 2010).

انرژی خروجی (E_{out})، انرژی حاصل از عملکرد ریشه بود که از رابطه زیر محاسبه گردید (Hatirli et al., 2006):

$$E_{out} = 0.23 * Y * C_p \quad (۱۰)$$

که در آن:

0.23 = درصد ماده خشک

E_{out} : انرژی کل خروجی از سیستم زراعی ($MJ ha^{-1}$)

Y: عملکرد ریشه تر ($kg ha^{-1}$)

C_p : انرژی نهفته در هر کیلوگرم ماده خشک چغندرقد که $16/8$ مگاژول در هر کیلوگرم است (Hülsbergen et al., 2001).

انرژی خروجی محصول چغندرقد، بر اساس ارزش حرارتی زیست‌توده و با استفاده از ضریب انرژی تقریبی $16/8 MJ kg^{-1}$ ماده خشک محاسبه شد (Demirbas, 2004; Kitani, 1999).

پس از محاسبه انرژی ورودی (E_{in}) و خروجی (E_{out})، بهره‌وری انرژی (EP) از نسبت انرژی خروجی (انرژی تولیدی دانه) به انرژی ورودی (آب آبیاری) از رابطه زیر محاسبه شد. مقادیر بالاتر از یک

وزن دهی یکسان برای تمامی معیارها (وزن هر معیار ۲۰ درصد) بودند. به عنوان معیارهای سودی (بیشتر بهتر) در نظر گرفته شدند. تبخیر - تعرق بعنوان معیار منفی (کمتر بهتر) و چهار شاخص دیگر

جدول ۳- انرژی ورودی و خروجی سیستم زراعی
Table 3- Input and output energy coefficients

سال Year	تیمار Treatment	حجم آب آبیاری (ورودی) Irrigation water volume (Input) (m ³ ha ⁻¹)	عملکرد ریشه (خروجی) Root Yield (Output) (kg ha ⁻¹)	انرژی ورودی Ein (MJ ha ⁻¹)	انرژی خروجی (Eout) (MJ ha ⁻¹)	بهره‌وری انرژی (EP)
اول First	T1	10383	41350	654.13	159776.40	244.27
	T2	8739	36350	550.56	140456.40	255.09
	T3	5968	26680	375.98	103091.50	274.25
دوم Second	T1	11094	47680	698.92	184235.50	263.58
	T2	9539	45400	600.96	175425.60	291.91
	T3	6188	34350	389.84	132728.40	340.67

جدول ۴- ماتریس تصمیم‌گیری تحلیل چندمعیاره
Table 4- Multi-criteria decision-making (MCDM) decision matrix

سال Year	گزینه‌ها Alternatives	تبخیر - تعرق Evapotranspiration (m ³ ha ⁻¹) (-)	عملکرد ریشه Root yield (ton ha ⁻¹) (+)	بهره‌وری آب Water Productivity (kg m ⁻³) (+)	بهره‌وری انرژی Energy Productivity (MJ per MJ) (+)	نسبت منفعت به هزینه (BCR) (+)
اول First	T1	8514	41.35	4.86	244.27	7.16
	T2	7166	36.35	5.07	255.09	6.29
	T3	4894	26.68	5.45	274.25	4.62
دوم Second	T1	9097	47.68	5.24	263.58	8.25
	T2	7822	45.40	5.80	291.91	7.86
	T3	5074	34.35	6.78	340.67	5.95

در این روش، بهترین و بدترین مقادیر هر معیار تعیین و مجموع فاصله‌های نرمال شده وزنی (Si) و حداکثر فاصله وزنی (Ri) برای هر تیمار از روابط زیر محاسبه گردید:

$$Q_i = v \left(\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right) + (1 - v) \left(\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (14)$$

که در آن: $R^- = \max_i R_i$, $R^* = \min_i R_i$, $S^- = \max_i S_i$, $S^* = \min_i S_i$ و v وزن استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است.

تحلیل پایداری و عدم قطعیت رتبه‌بندی تیمارها با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در این مطالعه، برای ارزیابی پایداری نتایج حاصل از روش ویکور تحت عدم قطعیت، از تحلیل مونت‌کارلو استفاده شد. این تحلیل با هدف بررسی تأثیر تغییرات پارامتر تصمیم‌گیری v بر رتبه‌بندی تیمارها انجام گرفت. برای بررسی عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری، پارامتر v که نشان‌دهنده تعادل بین معیارهای گروهی (S) و فردی (R) در روش

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (12)$$

$$R_i = \max_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (13)$$

که در آن f_j^* : بهترین مقدار معیار f_j ، f_j^- : بدترین مقدار معیار f_j ؛ مقدار معیار f_j برای گزینه i ، w_j : وزن معیار j و n : تعداد معیارها است. سپس شاخص ویکور (Q_i) به عنوان معیار نهایی رتبه‌بندی، با در نظر گرفتن وزن استراتژی توافقی ($v=0.5$) محاسبه شد. تیمار دارای کمترین مقدار Q به عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

ویکور است، به صورت تصادفی در بازه ۰/۲ تا ۰/۷ تولید شد. سپس برای هر مقدار تصادفی v ، الگوریتم ویکور اجرا و مقدار شاخص سازش پذیری (Q) برای هر تیمار محاسبه گردید. این فرآیند در قالب شبیه سازی مونت کارلو با تعداد ۱۰۰۰۰ تکرار برای هر سال زراعی انجام شد. در هر تکرار، رتبه بندی تیمارها بر اساس مقدار Q تعیین و جایگاه هر تیمار ثبت گردید. در نهایت، فراوانی قرارگیری هر تیمار در رتبه های اول، دوم و سوم محاسبه و به صورت احتمال (نسبت وقوع) گزارش شد. تمامی محاسبات با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون (Python) انجام شد و برای تولید اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت در بازه تعیین شده استفاده گردید. نتایج به دست آمده به منظور ارزیابی پایداری تصمیم گیری و حساسیت رتبه بندی نسبت به تغییرات پارامتر v مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

آنالیز واریانس و مقایسه میانگین

بر اساس نتایج آنالیز واریانس سال اول (جدول ۵) اثر تیمارهای

جدول ۵- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندر قند (سال اول)

Table 5- Analysis of variance for quantitative and qualitative traits of sugar beet (first year)

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (Degrees of freedom)	بهره وری آب ریشه Root water productivity	تبخیر-تعرق Evapotranspiration	عملکرد ریشه Root yield
MS [□]				
بلوک (Block)	3	0.04	26.10	1.68
تیمار (Treatment)	2	0.36 *	133886/80 **	222.63 **
خطا (Error)	6	0.06	99.42	2.37
CV%		4.95	1.45	4.43

MS[□]: میانگین مربعات

ns, *, **: به ترتیب معرف عدم معنی داری و معنی داری در سطح یک و پنج درصد

MS: Mean Squares

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

جدول ۶- مقایسه میانگین صفات کمی و کیفی چغندر قند بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد (سال اول)
Table 6- Comparison of mean quantitative and qualitative traits of sugar beet based on Duncan's test at the 5% level (first year)

تیمار Treatment	بهره وری آب ریشه Root water productivity (kg m ⁻³)	تبخیر-تعرق Evapotranspiration (mm)	عملکرد ریشه Root yield (ton ha ⁻¹)
T1	4.86 b	851.40 a	41.35 a
T2	5.07 ab	716.60 b	36.35 b
T3	5.45 a	489.40 c	26.68 c

سایر تیمارهای آبیاری بود.

تیمارهای آبیاری از نظر عملکرد ریشه در گروه های آماری مختلف قرار داشتند و تیمار T1 نسبت به تیمارهای دیگر برتری نشان داد. میانگین عملکرد ریشه در تیمارهای آبیاری به ترتیب ۴۱/۳۵، ۳۶/۳۵ و ۲۶/۶۸ تن در هکتار بود. توزیع داده های عملکرد ریشه بین تیمارهای

بررسی توزیع داده ها با استفاده از نمودار جعبه ای جان توکی نشان داد که دامنه تراکم داده ها، چولگی و حداقل و حداکثر تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف متفاوت است. در تیمار T2 همگنی داده ها بیشتر از سایر تیمارها و پراکندگی داده ها در آن دو طرفه و چولگی آن بیشتر از دو تیمار دیگر بود. دامنه تغییرات تبخیر-تعرق در تیمار T3 بیشتر از

بود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد کاهش مصرف آب از ۸۵۱۴ متر مکعب در تیمار T1 به ۷۱۶۶ متر مکعب در هکتار در تیمار T2 و از ۷۱۶۶ متر مکعب در هکتار در تیمار T2 به ۴۸۹۴ متر مکعب در هکتار در تیمار T3 تأثیر معنی‌داری در بهره‌وری آب عملکرد ریشه نداشت. بررسی توزیع جعبه‌ای داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در تیمار T3 پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها بود. پراکندگی داده‌ها دو طرفه و دامنه تغییرات آن بزرگ بود و میانه داده‌ها نشان داد چولگی در تیمار T1 تقریباً صفر و دو تیمار دیگر دارای چولگی می‌باشند.

نتایج آنالیز واریانس در سال دوم (جدول ۷) نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب عملکرد ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. اما اثر تیمارهای آبیاری بر عملکرد ریشه معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها در سطح پنج درصد با استفاده از آزمون دانکن انجام شد (جدول ۸).

آبیاری به‌خوبی نشان داد که با اعمال تنش، عملکرد در تیمارهای مختلف کاهش یافته است. دامنه میان چارکی داده‌ها (IQR) نشان داد که همگنی داده‌ها در تیمار T1 بیشتر از سایر تیمارها و در تیمار T2 نسبت به دو تیمار دیگر، پراکندگی در داده‌ها زیاد و دامنه تغییرات آن بزرگ بود. میانه داده‌ها نشان داد میزان چولگی داده‌ها در تیمارهای آبیاری کم و واریانس یا انحراف استاندارد در داده‌ها وجود داشت بود و نشان داد در همه تیمارها، میزان پراکندگی داده‌های بزرگ بیشتر از داده‌های کوچک بود.

مقایسه میانگین داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای آبیاری وجود دارد. تیمار T3 در گروه آماری a و تیمار T1 در گروه آماری b قرار گرفت. تیمار T2 در گروه ab و مشترک با تیمارهای T1 و T3 قرار گرفت. بیشترین بهره‌وری آب در تیمار T3 با میانگین تولید ۲۶/۶۸ تن ریشه به ازاء مصرف ۴۸۹۴ متر مکعب آب در هکتار ۵/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۷- تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی چغندرقد (سال دوم)

Table 7- Analysis of variance for quantitative and qualitative traits of sugar beet (second year)

منابع تغییرات (Sources of variation)	درجه آزادی (Degrees of freedom)	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity	تبخیر-تعرق Evapotranspiration	عملکرد ریشه Root yield
			MS [□]	
بلوک (Block)	3	0.11	39.15	2.30
تیمار (Treatment)	2	2.41 **	169018.42 **	203.20 ^{ns}
خطا (Error)	6	0.08	74.40	2.52
CV %		4.68	1.18	3.73

MS[□]: میانگین مربعات

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

MS: Mean Squares

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

جدول ۸- مقایسه میانگین صفات کمی و کیفی چغندرقد بر اساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد (سال دوم)

Table 8- Comparison of mean quantitative and qualitative traits of sugar beet based on Duncan's test at the 5% level (second year)

تیمار Treatment	بهره‌وری آب ریشه Root water productivity (kg m ⁻³)	تبخیر-تعرق Evapotranspiration (mm)	عملکرد ریشه Root yield (ton ha ⁻¹)
T1	5.24 c	909.70 a	47.68 a
T2	5.80 b	782.20 b	45.40 a
T3	6.78 a	507.40 c	34.35 a

نشان داد در این تیمار، پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها بود. پراکندگی داده‌های تیمارها دو طرفه و دامنه تغییرات آن کوچک و چولگی آن صفر بود.

تیمارهای آبیاری از نظر عملکرد ریشه در یک گروه آماری قرار داشتند و مقدار آن در تیمار T1 (۴۷/۶۸ تن در هکتار) نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر بود. میانگین عملکرد ریشه در تیمار T2 و T3 به ترتیب ۴۵/۴ و ۳۴/۳۵ تن در هکتار به‌دست آمد. دامنه میان چارکی

نتایج مقایسه میانگین داده‌های تبخیر-تعرق نشان داد هر یک از تیمارها در گروه‌های مختلف قرار دارند. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۴۰ درصد، مقدار تبخیر-تعرق ۹۰۹/۷ میلی‌متر و در مدیریت آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۶۰ درصد مقدار تبخیر-تعرق ۷۸۲/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در تیمار آبیاری با ضریب تخلیه مجاز رطوبتی ۸۰ درصد و با افزایش تنش آبی، مقدار تبخیر-تعرق گیاه به ۵۰۷/۴ میلی‌متر کاهش یافت. توزیع جعبه‌ای داده‌ها در تیمار T1،

۳۴/۷، ۴۷/۷ و ۴۱/۳ میلی‌متر محاسبه شد.

ارزش اقتصادی محصول تولیدی (ریشه چغندر قند)

نتایج تحلیل اقتصادی دو سال پژوهش نشان داد که تیمار T1 با نسبت منفعت به هزینه ۷/۱۶ در سال اول و ۸/۲۵ در سال دوم، همواره بالاترین بازده اقتصادی را داشته و مطلوب‌ترین گزینه اقتصادی محسوب می‌شود. تیمار T2 با نسبت‌های ۶/۲۹ و ۷/۸۶ در جایگاه دوم قرار گرفت، در حالی که تیمار T3 با نسبت‌های ۴/۶۲ و ۵/۹۵ کمترین بازده را نشان داد و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. علی‌رغم برتری فنی تیمار T2 در بهره‌وری آب، تیمار T1 از لحاظ اقتصادی برتر است. این موضوع لزوم ایجاد توازن بین اهداف فنی (بهره‌وری آب) و اقتصادی (بازده مالی) را از طریق تحلیل چندمعیاره در انتخاب تیمار آبیاری بهینه نشان می‌دهد.

رتبه‌بندی تیمارهای آبیاری

در سال اول، مقادیر شاخص سازش‌پذیری (Q) نشان داد که تیمار T2 با مقدار ۰/۲۹۷۱ در رتبه اول قرار گرفت، در حالی که تیمار T3 با مقدار ۰/۵ در رتبه دوم و تیمار T1 با مقدار ۱ در رتبه سوم جای گرفتند (شکل ۱). بررسی همزمان شاخص‌های S و R نشان می‌دهد که تیمار T2 نه تنها از نظر عملکرد تجمعی معیارها ($S=0/5188$) وضعیت مطلوب‌تری نسبت به T1 دارد، بلکه در مقایسه با T3 نیز توانسته است سطح قابل قبولی از تعادل بین کارایی کلی و حداقل نارضایتی فردی ($R=0/1288$) برقرار کند. اگرچه تیمار T3 کمترین مقدار S (برابر ۰/۴) را دارد که بیانگر عملکرد مناسب در برخی معیارهاست، اما مقدار نسبتاً بالاتر R (برابر ۰/۲) نشان می‌دهد که در حداقل یکی از معیارها فاصله قابل توجهی از وضعیت ایده‌آل دارد؛ موضوعی که باعث شده در رتبه دوم قرار گیرد. در مقابل، تیمار T1 با مقادیر بالاتر S و R (به ترتیب ۰/۶ و ۰/۲) بیانگر عملکرد ضعیف‌تر در اکثر معیارها بوده و در نتیجه در رتبه سوم جای گرفته است. در مجموع، نزدیکی نسبی مقادیر Q بین T2 و T3 حاکی از آن است که در سال اول، تمایز بین گزینه‌های برتر چندان شدید نبوده و رقابت محدودی میان این دو تیمار وجود داشته است.

در سال دوم نیز الگوی کلی رتبه‌بندی مشابه سال اول اما با شدت و وضوح بیشتر تکرار شد (شکل ۲). تیمار T2 با مقدار Q برابر با ۰/۱۴۶۳ و وضوح بیشتر تکرار شد (شکل ۲). تیمار T2 با مقدار Q برابر با ۰/۱۴۶۳ در رتبه اول قرار گرفت و فاصله آن با سایر تیمارها به‌طور محسوسی افزایش یافت. این تیمار علاوه بر داشتن مقدار پایین‌تر S (۰/۴۵۸۵) نسبت به T1، از نظر شاخص R نیز در سطح مطلوب‌تری (۰/۱۳۶۶) قرار دارد که نشان‌دهنده عملکرد متوازن‌تر آن در تمامی معیارهاست. در مقابل، تیمار T3 با وجود داشتن کمترین مقدار S (۰/۴)، به دلیل مقدار بالاتر R (۰/۲) توانسته به رتبه اول دست یابد و در جایگاه دوم باقی مانده است.

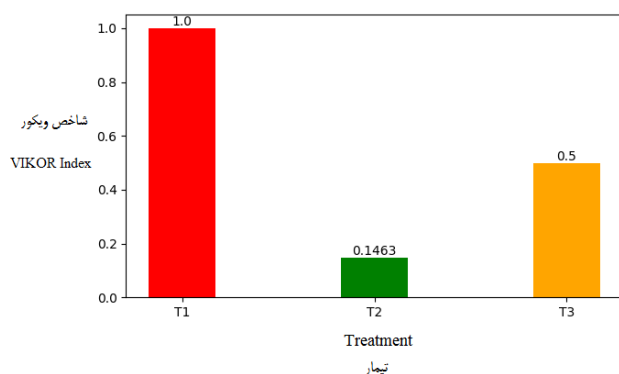
داده‌های عملکرد ریشه (IQR) نشان داد که همگنی داده‌ها در تیمار T1 بیشتر از سایر تیمارها بود. در تیمار T3 نسبت به دو تیمار دیگر، پراکندگی در داده‌ها زیاد و دامنه تغییرات آن بزرگ است. میانه داده‌ها نشان داد میزان چولگی داده‌ها در تیمارهای آبیاری کم بود اما واریانس یا انحراف استاندارد در داده‌ها مشاهده شد.

از نظر بهره‌وری آب عملکرد ریشه، تیمار T3 در گروه آماری a و تیمار T2 در گروه آماری b و تیمار T1 در گروه آماری c قرار گرفت. بیشترین بهره‌وری آب (۶/۷۸ کیلوگرم ریشه به ازاء هر متر مکعب آب) مربوط به تیمار T3 با میانگین تولید ۳۴/۳۵ تن ریشه به ازاء مصرف ۵۰۷۴ متر مکعب در هکتار بود. توزیع جعبه‌ای داده‌های بهره‌وری آب نشان داد در تیمار T3 پراکندگی داده‌ها زیاد و همگنی داده‌ها کمتر از سایر تیمارها است، در این تیمار، پراکندگی داده‌ها دو طرفه و دامنه تغییرات آن بزرگ است. میانه داده‌ها نشان داد چولگی در تیمار T1 تقریباً صفر و در دو تیمار دیگر چولگی جزئی وجود داشت.

نتایج این تحقیق با مطالعات پیشین در مورد تأثیر تنش آبی بر عملکرد و بهره‌وری آب در چغندر قند همخوانی دارد. همان‌طور که توسط محققان متعددی گزارش شده است (Brown et al., 1987; Shrestha et al., 2010)، تنش خشکی به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، منجر به کاهش عملکرد ریشه می‌گردد. با این حال، یافته کلیدی پژوهش حاضر و مطالعات مشابه نشان می‌دهد که مدیریت آبیاری به‌صورت کم‌آبیاری کنترل‌شده می‌تواند بهره‌وری آب را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. در این تحقیق، تیمار با بیشترین محدودیت آبی (تخلیه رطوبتی ۸۰ درصد) با وجود کاهش مصرف آب و تبخیر و تعرق، بالاترین بهره‌وری آب را برای عملکرد ریشه و قند خالص به ثبت رساند. این نتیجه با گزارش‌های محققانی که بهبود بهره‌وری آب را تحت استراتژی‌های کم‌آبیاری تأیید کرده‌اند، همخوانی کامل دارد (Jensen et al., 2014; Topak et al., 2010b). بنابراین، اگرچه کاهش حجم آب آبیاری ممکن است عملکرد نهایی را تحت تأثیر قرار دهد، اما به‌عنوان یک راهکار عملی در شرایط کمبود آب، افزایش بهره‌وری آب را در پی خواهد داشت که حاکی از تخصیص بهینه‌تر منابع آب در واحد تولید است.

زمان‌بندی و عمق آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری

با توجه به اینکه زمان و عمق آبیاری بر اساس پایش رطوبت خاک و رسیدن به آستانه‌های ضرایب تخلیه مجاز رطوبتی خاک (MAD) تعیین می‌شود، فاصله و عمق آبیاری در طول فصل رشد ثابت نبود. با این حال، تعداد آبیاری‌های انجام‌شده در سال اول برای تیمارهای T1، T2 و T3 به ترتیب ۳۵، ۲۳ و ۱۷ نوبت و در سال دوم به ترتیب ۳۲، ۲۰ و ۱۵ نوبت بود. بر این اساس، میانگین عمق آب آبیاری در هر نوبت در سال اول به ترتیب ۲۹/۷، ۳۸ و ۳۵/۱ میلی‌متر و در سال دوم به ترتیب

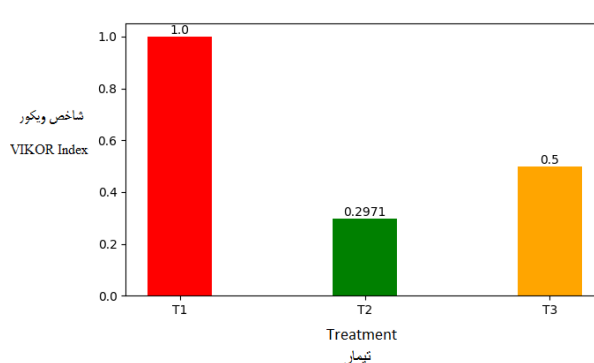


شکل ۲- رتبه‌بندی تیمارها (سال دوم)
Figure 2- Ranking of treatments (Year 2)

۳۵ درصدی عملکرد و کاهش سودآوری اقتصادی، تنها در شرایط کمبود شدید آب قابل توصیه است.

تحلیل حساسیت مونت کارلو

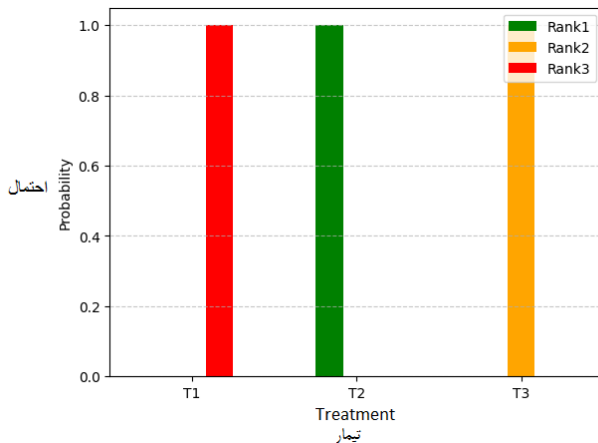
به منظور سنجش پایداری نتایج و ارزیابی میزان حساسیت رتبه‌بندی نسبت به تغییرات پارامتر v ، شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار اجرا شد. در سال اول (شکل ۳)، نتایج نشان داد که تیمار T2 در ۸۵/۹۴ درصد تکرارها رتبه اول را کسب کرده و در ۱۴/۰۶ درصد موارد در جایگاه دوم قرار گرفته است. در مقابل، تیمار T3 عمدتاً در رتبه دوم و در بخشی از تکرارها در رتبه اول ظاهر شده است، در حالی که تیمار T1 در تمامی تکرارها در رتبه سوم باقی مانده است. این الگو حاکی از آن است که اگرچه T2 به عنوان گزینه غالب شناخته می‌شود، اما در برخی حالات ناشی از تغییر مقدار v ، جایجایی محدودی میان آن و T3 رخ می‌دهد؛ موضوعی که بیانگر حساسیت نسبی رتبه‌های برتر به ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. در سال دوم (شکل ۴)، وضعیت کاملاً متفاوتی مشاهده شد و نتایج از ثبات بسیار بالای رتبه‌بندی حکایت داشت. به گونه‌ای که تیمار T2 در تمام تکرارها (۱۰۰ درصد) در جایگاه نخست قرار گرفت و هیچ تغییری در رتبه آن ثبت نشد. همچنین، تیمار T3 همواره در رتبه دوم و تیمار T1 در رتبه سوم قرار داشتند، بدون آن که جایجایی میان آن‌ها رخ دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رتبه‌بندی در این سال نسبت به تغییرات پارامتر v کاملاً غیرحساس بوده و از پایداری کامل برخوردار است؛ بنابراین، انتخاب تیمار T2 به عنوان گزینه برتر در این شرایط، نتیجه‌ای قطعی و قابل اتکا محسوب می‌شود.



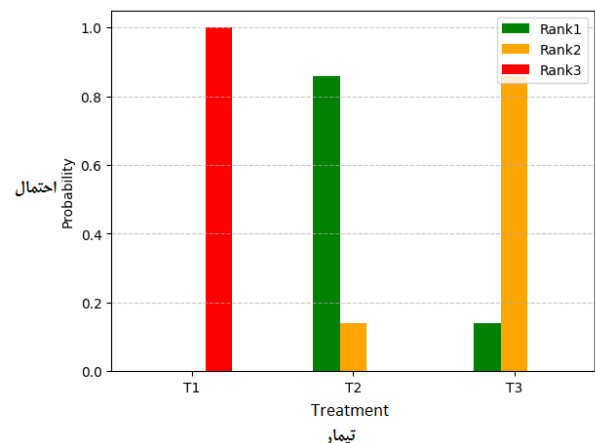
شکل ۱- رتبه‌بندی تیمارها (سال اول)
Figure 1- Ranking of treatments (Year 1)

تیمار T1 نیز مشابه سال قبل، با بالاترین مقادیر S و R (۰/۶ و ۰/۲) در رتبه سوم قرار گرفت که بیانگر ناکارآمدی نسبی آن در ترکیب معیارهای مورد بررسی است. نکته قابل توجه در سال دوم، افزایش فاصله بین مقدار Q تیمار برتر (T2) و سایر تیمارهاست که نشان‌دهنده تقویت برتری این تیمار و کاهش هم‌پوشانی عملکردی بین گزینه‌ها می‌باشد. ثبات مقدار Q در تیمارهای حدی (T1 و T3) نشان‌دهنده پایداری ساختار رتبه‌بندی و عدم تغییر الگوی نسبی عملکرد بین سال‌های زراعی است. مقدار $Q=1$ برای T1 ناشی از قرارگیری همزمان این تیمار در بدترین وضعیت نسبت به معیارهای S و R بوده و بیانگر انحراف کامل آن از نقطه ایده‌آل می‌باشد.

در مجموع، مقایسه نتایج دو سال نشان می‌دهد که اگرچه ترتیب رتبه‌بندی تیمارها ($T2 > T3 > T1$) در هر دو سال یکسان است، اما شدت برتری تیمار T2 در سال دوم بیشتر از سال اول بوده است. این امر حاکی از آن است که شرایط محیطی یا مدیریتی در سال دوم موجب افزایش کارایی نسبی این تیمار شده و تمایز آن را نسبت به سایر گزینه‌ها برجسته‌تر کرده است. بنابراین، تیمار T2 نه تنها از نظر مقدار شاخص Q در هر دو سال به عنوان گزینه برتر معرفی می‌شود، بلکه از منظر پایداری عملکرد و تعادل بین معیارهای مختلف نیز می‌تواند به عنوان یک گزینه قابل اتکا برای توصیه در شرایط مشابه در نظر گرفته شود. تیمار T2 در مقایسه با T1 موجب کاهش ۱۶ درصدی مصرف آب شد، در حالی که کاهش عملکرد ناچیزی (کمتر از ۱۰ درصد) داشت. از سوی دیگر، تیمار T3 اگرچه بالاترین بهره‌وری آب (۵/۴۵ و ۶/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب در سال‌های اول و دوم) و بهره‌وری انرژی (۲۷۴/۲۵ و ۳۴۰/۶۷ مگاژول بر مگاژول) را نشان داد، اما به دلیل کاهش



شکل ۴- شبیه‌سازی مونت کارلو امتیازهای روش ویکور (سال دوم)
Figure 4- Monte Carlo simulation of VIKOR scores (Year 2)



شکل ۳- شبیه‌سازی مونت کارلو امتیازهای روش ویکور (سال اول)
Figure 3- Monte Carlo simulation of VIKOR scores (Year 1)

در همین راستا، پژوهش‌های کاربردی در حوزه کشاورزی و منابع آب نیز نشان داده‌اند که ترکیب تحلیل چندمعیاره با تحلیل‌های تصادفی می‌تواند به درک بهتر رفتار سیستم تحت شرایط عدم قطعیت کمک کند (Mardani et al., 2017).

به‌طور کلی، مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش ویکور در شرایط عدم قطعیت متوسط می‌تواند منجر به رقابت بین گزینه‌های نزدیک شود، در حالی که در شرایط اختلاف عملکرد مشخص‌تر، یک گزینه غالب و پایدار شناسایی می‌شود. بنابراین، استفاده از تحلیل مونت کارلو در کنار روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نقش مهمی در افزایش اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج در سیستم‌های کشاورزی تحت عدم قطعیت دارد.

در مجموع، مقایسه دو سال نشان می‌دهد که سطح اطمینان در تصمیم‌گیری طی سال دوم به مراتب بیشتر از سال اول است. در حالی که در سال اول نوعی هم‌پوشانی عملکردی میان T2 و T3 مشاهده می‌شود، در سال دوم تمایز بین تیمارها کاملاً شفاف و بدون ابهام است. این تفاوت بیانگر آن است که شرایط سال دوم منجر به شکل‌گیری ساختاری پایدارتر در فرآیند تصمیم‌گیری شده و نقش تحلیل مونت کارلو را در آشکارسازی میزان اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه در مواجهه با عدم قطعیت‌های رایج در مطالعات کشاورزی، برجسته می‌سازد.

در آنالیز واریانس، تفاوت معنی‌دار تیمارهای سطوح تخلیه مجاز رطوبت خاک نشان داد که تغییر سطح آبیاری اثر واقعی و آماری بر پاسخ‌های زراعی و انرژی دارد. همین الگوی تفاوت در تحلیل چندمعیاره نیز بازتاب یافت؛ به‌گونه‌ای که تیمار T3 در شاخص‌های منفرد برتری مشخصی داشت، اما تیمار T2 به‌دلیل تعادل نسبی بین معیارها، جایگاه

نتایج تحلیل مونت کارلو نشان داد که پایداری رتبه‌بندی در روش ویکور به شرایط سال زراعی و میزان عدم قطعیت وابسته است. در سال اول، وجود رقابت نزدیک بین تیمارهای T2 و T3 و تغییر احتمالی رتبه‌ها تحت تأثیر پارامتر γ بیانگر حساسیت نسبی مدل به وزن‌دهی بین معیارهای گروهی و فردی است. این رفتار با مطالعات پیشین در حوزه تصمیم‌گیری چندمعیاره هم‌راستا است، به‌طوری که تغییر در وزن معیارها و پارامترهای تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به تغییر در رتبه‌بندی نهایی شود و نتایج ذاتاً دارای ماهیت حساس به عدم قطعیت هستند (Opricovic & Tzeng, 2004; Mardani et al., 2015b).

در مقابل، سال دوم نشان‌دهنده یک ساختار تصمیم‌گیری کاملاً پایدار و مقاوم در برابر تغییرات پارامتر γ بود، به‌طوری که یک تیمار (T2) در تمام سناریوهای مونت کارلو به‌عنوان گزینه برتر شناسایی شد. این یافته با نتایج مطالعاتی که بر پایداری روش ویکور در شرایط اختلاف واضح بین گزینه‌ها تأکید دارند همخوانی دارد. در این مطالعات نشان داده شده است که زمانی که فاصله عملکردی بین گزینه‌ها در معیارهای کلیدی افزایش یابد، روش‌های ویکور و سایر روش‌های تحلیل چندمعیاره به سمت نتایج پایدار و همگرا حرکت می‌کنند (Liao & Xu, 2013; Kahraman et al., 2014).

همچنین استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به‌عنوان ابزار تحلیل عدم قطعیت در تصمیم‌گیری چندمعیاره، در مطالعات اخیر به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارزیابی پایداری و مقاومت یک مدل یا نتیجه در برابر تغییرات و عدم قطعیت‌ها نتایج معرفی شده است. این روش امکان بررسی طیف گسترده‌ای از سناریوهای احتمالی را فراهم می‌کند و نقش مهمی در اعتبارسنجی تصمیم‌های حاصل از مدل‌های تحلیل چندمعیاره دارد (Zavadskas et al., 2014; Senvar et al., 2016).

آبیاری مبتنی بر تخلیه ۶۰ درصد رطوبت قابل دسترس خاک توانست مناسب‌ترین تعادل را میان حفظ تولید، افزایش بهره‌وری آب و انرژی و سودآوری اقتصادی ایجاد کند. همچنین نتایج روش ویکور و تحلیل عدم قطعیت مونت کارلو پایداری این راهبرد را در مقایسه با سایر تیمارها تأیید کرد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به اجرای آزمایش در یک منطقه و طی دو سال زراعی و همچنین عدم بررسی اثرات بلندمدت مدیریت آبیاری بر ویژگی‌های خاک و رشد ریشه اشاره کرد. بنابراین، تعمیم نتایج به سایر شرایط اقلیمی و خاکی نیازمند مطالعات تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، راهبردهای آبیاری در مناطق مختلف اقلیمی و در ترکیب با ارقام محتمل به خشکی، سامانه‌های نوین آبیاری و مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه مورد ارزیابی قرار گیرند تا راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت پایدار آب در تولید چغندرقد ارائه شود.

مطلوب‌تری کسب کرد. این همگرایی نشان می‌دهد که نتایج تحلیل چندمعیاره صرفاً حاصل یک تکنیک ریاضی نیست، بلکه بر پایه تفاوت‌های واقعی مشاهده‌شده در داده‌های آزمایشی استوار است. بنابراین، تحلیل چندمعیاره در این پژوهش نه تنها مکمل آنالیز واریانس بوده، بلکه با تلفیق هم‌زمان اثرات چند شاخص معنی‌دار، چارچوب تصمیم‌گیری کاربردی‌تری برای انتخاب سطح بهینه آبیاری ارائه کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت آبیاری نقش مهمی در ایجاد تعادل میان عملکرد محصول، بهره‌وری منابع و بازده اقتصادی چغندرقد در شرایط نیمه‌خشک دارد. در میان تیمارهای بررسی‌شده،

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.32614/cran.package.meto>
- Arjeh, E., Mohammadi, A., & Karami, M. (2019). Energy use efficiency and sustainability assessment in sugar beet production under different agronomic practices. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 34(4), 320–330. <https://doi.org/10.1017/S1742170519000015>
- Asgharipour, M.R., Mondani, F., & Riahinia, S. (2012). Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy*, 44(1), 1078–1084. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.023>
- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.18356/942430a9-en>
- Balta, A., Yazar, A., & Öztürk, H. (2021). Improvement of water saving and economic productivity based on sugar content of sugar beet using linear move sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*, 255, 106989. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106989>
- Brown, K.F., Messen, A.B., Dunham, R.J., & Biscoe, P.V. (1987). Effect of drought on growth and water use of sugar beet. *The Journal of Agricultural Science*, 109(3), 421–435. <https://doi.org/10.1017/S0021859600081636>
- Caliskan, S., & Caliskan, M.E. (2010). Evaluation of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97(2), 357–362. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.010>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Doorenbos, J., & Kassam, A.H. (1979). *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- El Hamdi, E., El Amrani, A., & Boufaroua, M. (2017a). Effect of deficit irrigation on sugar beet yield and water use efficiency in semi-arid conditions. *Sugar Tech*, 19(6), 583–590. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0512-3>
- El Hamdi, K., Benkouider, M., & El Gharras, H. (2017b). Effect of deficit irrigation on sugar beet productivity and water use efficiency. *Sugar Tech*, 19(5), 477–485. <https://doi.org/10.1007/s12355-017-0521-0>
- Gomez, K.A., & Gomez, A.A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hatirli, S.A., Ozkan, B., & Fert, C. (2006). Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy*, 31(4), 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.007>
- Hinkelmann, K., & Kempthorne, O. (2008). *Design and analysis of experiments: Volume 1, Introduction to experimental design* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hülsbergen, K.-J., Feil, B., & Lippert, C. (2001). Energy equivalents for harvested sugar beets and other farm outputs. *Plant, Soil and Environment*, 67(3), 137–146. <https://doi.org/10.17221/615/2020 PSE>
- Iran Meteorological Organization. (2021). Long-term climatic data for Karaj region (1992–2021). Tehran, Iran.
- Jensen, C.R., Ørum, J.E., Pedersen, S.M., Andersen, M.N., Plauborg, F., Liu, F., & Jacobsen, S.E. (2014). A short

- overview of measures for securing water resources for irrigated crop production. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(5), 333-343. <https://doi.org/10.1111/jac.12067>
18. Kahraman, C., Kaya, I., & Cebi, S. (2014). A comparative analysis of MCDM methods. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3265-3277. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.12.010>
 19. Kitani, O. (Ed.). (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering, Vol. V: Energy and biomass engineering*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.36416>
 20. Liao, H., & Xu, Z. (2013). Extension of VIKOR for multi-criteria decision-making problems under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 40(5), 1624-1631. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.007>
 21. Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K.M., Zavadskas, E.K., & Cavallaro, F. (2015a). Multiple criteria decision-making techniques and their applications. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516-549. <https://doi.org/10.1080/1331677x.2015.1075139>
 22. Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K., & Khalifah, Z. (2017). Sustainable decision-making in agriculture using MCDM methods. *Sustainability*, 9(6), 1-25. <https://doi.org/10.3390/su9061000>
 23. Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E.K., Khalifah, Z., & Cavallaro, F. (2015b). Multiple criteria decision-making techniques and their applications- a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516-571. <https://doi.org/10.1080/1331677x.2015.1075139>
 24. Metekan, M. (2012). *Climatic classification of Iran based on Domarten system*. [Publisher/Journal if available].
 25. Michael, A.M. (2008). *Irrigation: Theory and practice* (2nd ed.). Vikas Publishing House.
 26. Nasiri-Mahallati, M., Kuchaki, A., & Zare Feizabadi, E. (2014a). Effects of irrigation levels and nitrogen fertilizer on water use efficiency and water productivity of sugar beet and other crops. *Journal of Agricultural Ecology*, 6(2), 187-198. <https://doi.org/10.22067/jag.v6i2.39361>
 27. Nasiri-Mahallati, M., Kuchaki, A., & Zare Feizabadi, S. (2014b). Water use efficiency of sugar beet under different irrigation methods. *Irrigation Science*, 32, 123-134. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0432-1>
 28. Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems* [Doctoral dissertation, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade].
 29. Opricovic, S., & Tzeng, G.H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
 30. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29(1), 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
 31. Petersen, R.G. (1994). *Agricultural field experiments: Design and analysis*. CRC Press.
 32. Piri, H., & Mobaraki, M. (2021). Water footprint and water productivity assessment of major crops under different irrigation regimes in Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(6), 103-120. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18398.3399>
 33. Rafiee, S., Mousavi Avval, S.H., & Mohammadi, A. (2010). Modeling and sensitivity analysis of energy inputs for apple production in Iran. *Energy*, 35(8), 3301-3306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.015>
 34. Senvar, O., Tuzkaya, G., & Kahraman, C. (2016). Fuzzy VIKOR method and Monte Carlo simulation in decision-making. *Applied Soft Computing*, 45, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.012>
 35. Seydan, M.M., & Mansouri, H. (2019a). Assessment of water productivity in sugar beet cultivation under drip and conventional irrigation systems in Hamedan province. *Journal of Agricultural Ecology*, 11(2), 673-686. <https://doi.org/10.22067/jag.v11i2.68593>
 36. Seydan, M., & Mansouri, S. (2019b). Effects of irrigation management on sugar beet water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 213, 872-879. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.015>
 37. Shrestha, N., Geerts, S., Raes, D., Horemans, S., Soentjens, S., Maupas, F., & Clouet, P. (2010). Yield response of sugar beets to water stress under Western European conditions. *Agricultural Water Management*, 97(2), 346-350. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.005>
 38. Smith, J., & Jones, R. (2010). Effects of irrigation regimes on sugar beet yield and water productivity in Europe. *European Journal of Agronomy*, 32(3), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.07.004>
 39. Topak, H., Kaya, C., & Genç, A. (2010a). Energy use efficiency of sugar beet under different irrigation levels. *Energy*, 35(9), 3684-3690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007>
 40. Topak, R., Süheri, S., & Acar, B. (2010b). Comparison of energy usage of different irrigation regimes in sugar beet production in a semi arid region. *Energy*, 35(12), 5464-5471. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.018>
 41. Wang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2020). Application of TOPSIS and multi-criteria decision-making for irrigation management. *Water*, 12(7), 1902. <https://doi.org/10.3390/w12071902>
 42. Yousefi, M., & Mahdavi Damghani, A. (2015). Water, nitrogen and energy use efficiency in major crop production systems in Iran. *Advances in Plants and Agriculture Research*, 2(3), 126-129. <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00050>
 43. Yousefi, S. (2015). Optimizing irrigation management for sugar beet to improve productivity and water efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(5), 04014078. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jir.1943-](https://doi.org/10.1061/(asce)jir.1943-)

4774.0000826

44. Zavadskas, E.K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of MCDM methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 13(2), 491–516. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>