Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

https://wra.areeo.ac.ir/

Multi-Criteria Analysis of Management Allowed Moisture Deficit in Sugar Beet (Shokoufa Variety)

R. Mohammadikia*

Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. **rmswri@gmail.com**

Article Info

Research Article

Received: February 07, 2026

Accepted: March 16, 2026

Keywords: Irrigation management; Multi-criteria decision making; Sensitivity analysis; Water productivity

Corresponding author's email: rmswri@gmail.com

Abstract

The objective of this study was to investigate the effects of different irrigation treatments based on the Management Allowable Depletion (MAD) of soil moisture on the yield, quality, and water productivity of sugar beet. A field experiment was conducted in Karaj, Iran, during two growing seasons (2017–2019) using a randomized complete block design with three irrigation treatments (MAD=40%, 60%, and 80%) and four replications. Quantitative and qualitative traits, including evapotranspiration, root and sugar yield, pure sugar percentage, extraction and alkalinity coefficient, were measured, and water productivity was calculated. Analysis of variance indicated significant effects of the treatments and year on the measured traits. Multi-criteria decision analysis using the TOPSIS method, coupled with sensitivity analysis of criterion weights and Monte Carlo simulation, was employed to evaluate the ranking and stability of the treatments. According to the TOPSIS results, the treatment with a MAD of 60% achieved the highest rank with a closeness coefficient of 0.577, and was identified as the optimal option. The treatment with MAD=40% ranked second with a closeness coefficient of 0.479. Conversely, the treatment with MAD=80% obtained the lowest rank with a closeness coefficient of 0.373, indicating a greater distance from the ideal conditions in the simultaneous evaluation of the considered criteria. Monte Carlo simulation results, incorporating a ±10% fluctuation in criterion weights, revealed that MAD= 60% retained the first rank in 99.87% of the simulations. This demonstrates high stability in the ranking and robustness of the decision against weight uncertainty, providing strong confidence that the selection of this treatment, under various management conditions and criterion weighting scenarios, represents the best option for optimizing both yield and water productivity of sugar beet.

Cite this article: Mohammadikia, R., 2026. Multi-Criteria Analysis of Management Allowed Moisture Deficit in Sugar Beet (Shokoufa Variety). ***Journal of Water Research in Agriculture,39(4), pp. 341-357.***

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372163.1107

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه پژوهش آب در کشاورزی

https://wra.areeo.ac.ir

تحلیل چندمعیاره سطوح حد مجاز تخلیه رطوبت خاک در چغندرقند (رقم شکوفا)

رضا محمدی‌کیا*

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

rmswri@gmail.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب؛ تحلیل حساسیت؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ مدیریت آبیاری

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

rmswri@gmail.com

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی اثر تیمارهای مختلف آبیاری مبتنی بر حد مجاز تخلیه رطوبت خاک (MAD) بر عملکرد، کیفیت و بهره‌وری آب چغندرقند رقم «شکوفا» بود. آزمایش مزرعه‌ای در کرج طی دو سال زراعی (۱۳۹۸-۱۳۹۶) با سه سطح حد مجاز تخلیه رطوبت خاک ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ به‌عنوان تیمارهای آبیاری در چهار تکرار انجام شد. صفات کمی و کیفی شامل تبخیر –تعرق، عملکرد ریشه و قند، درصد قند خالص، ضریب استحصال و قلیائیت اندازه‌گیری شد و بهره‌وری آب محاسبه گردید. آنالیز واریانس داده‌ها، تأثیر تیمارها و سال را بر صفات نشان داد و تحلیل چندمعیاره تاپسیس(TOPSIS) با تحلیل حساسیت وزن معیارها تصمیم‌گیری شد و شبیه‌سازی مونت کارلو، رتبه‌بندی و ثبات رتبه‌بندی تیمارها را ارزیابی کرد. بر اساس نتایج روش تاپسیس، تیمار با ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰٪ با ضریب نزدیکی ۰/۵۷۷ در رتبه نخست قرار گرفت و بهترین گزینه شد. تیمار با ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۴۰٪ با ضریب نزدیکی ۰/۴۷۹ در رتبه دوم قرار گرفت. تیمار با ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۸۰٪ با ضریب نزدیکی ۰/۳۷۳ کمترین رتبه را کسب کرد، که بیانگر فاصله بیشتر آن از شرایط ایده‌آل در ارزیابی هم‌زمان معیارهای مورد بررسی بود. نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با ٪۱۰± نوسان در وزن معیارها نشان داد تیمار با ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰٪ در ۹۹٪/۸۷ از شبیه‌سازی‌ها رتبه اول را کسب کرد. این امر بیانگر ثبات بالای رتبه‌بندی و مقاومت تصمیم‌گیری نسبت به عدم قطعیت وزن‌ها است و اطمینان بالایی می‌دهد که انتخاب این تیمار در شرایط مختلف مدیریتی و وزن‌دهی معیارها، بهترین گزینه برای بهینه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند است.

استناد: محمدی‌کیا، رضا ، ۱۴۰۴. تحلیل چندمعیاره سطوح حد مجاز تخلیه رطوبت خاک در چغندرقند (رقم شکوفا). *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۹ (۴)، صص.۳۴۱-۳۵۷.

DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372163.1107

مقدمه

چغندرقند (*Beta vulgaris L.*) از مهم‌ترین محصولات صنعتی خانواده اسفناجیان (Amaranthaceae) است و با تأمین نزدیک به ۲۰ درصد تولید جهانی شکر، نقش اساسی در امنیت غذایی و زنجیره صنایع کشاورزی و صنعتی ایفا می‌کند (لاو و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، کشت چغندرقند در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های جدی مواجه است، زیرا این گیاه نیاز آبی نسبتاً بالایی دارد. مطالعات نشان داده است که مصرف آب در طول فصل رشد معمولاً بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است که بسته به شرایط اقلیمی و مدیریت آبیاری متفاوت است و به‌ویژه در مراحل اولیه رشد نسبت به کمبود آب حساس است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ رینالدی و وونلا، ۲۰۰۶). این حساسیت به خشکی باعث کاهش رشد ریشه و ذخیره قند می‌شود و به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی تولید چغندرقند در شرایط کم‌آبی شناخته شده است (بودنر و السالم، ۲۰۲۳؛ کرد رستمی و همکاران، ۲۰۲۶).

خشکی محیط رشد یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان است و اثرات گسترده‌ای بر فیزیولوژی و عملکرد زراعی دارد. شرایط تنش خشکی تعادل آب در گیاه را مختل می‌کند، موجب کاهش توان گیاه در حفظ فشار تورژسانس می‌شود و با کاهش هدایت روزنه‌ای، تبادل گازها، به‌ویژه جذب دی‌اکسیدکربن مورد نیاز برای فتوسنتز را محدود می‌سازد. همچنین، کمبود آب با کاهش جریان آب ریشه و انتقال یون‌ها، جذب عناصر غذایی از خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (چیب و گاکومو، ۲۰۲۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۳). این اختلالات فیزیولوژیکی به‌طور مستقیم بر عملکرد کمی و کیفی گیاه تأثیر می‌گذارند؛ کاهش رشد ریشه و تشکیل زیست‌توده موجب کاهش عملکرد کلی می‌شود و محدودیت فتوسنتز و جذب عناصر غذایی اثرات منفی بر محتوای قندی و کیفیت محصول دارد. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تنش خشکی می‌تواند هم‌زمان موجب کاهش رشد، عملکرد و کیفیت محصولات زراعی شود که اهمیت مدیریت بهینه آب برای افزایش عملکرد و کیفیت محصول را برجسته می‌کند (گوپتا و همکاران، ۲۰۲۱؛ چاوِس و اولیویرا، ۲۰۲۱).

با توجه به تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آب و افزایش تقاضای جهانی برای غذا و انرژی، مدیریت پایدار آب به یکی از چالش‌های اصلی بخش کشاورزی تبدیل شده است (فاروق و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۲). راهبردهای آبیاری کارآمد که بتوانند بهره‌وری آب[1] (WP) را افزایش داده و هم‌زمان عملکرد و کیفیت محصول را حفظ کنند، به‌ویژه در مناطق کم‌آب مانند ایران، ضروری هستند.

کم‌آبیاری که در آن مقدار آب آبیاری عمدتاً کمتر از نیاز کامل گیاه تأمین می‌شود، به‌عنوان یک راهبرد مدیریتی مؤثر برای بهبود بهره‌وری آب در کشاورزی شناخته شده است و مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کم‌آبیاری، در حالی که موجب کاهش نسبی عملکرد می‌شود، می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش دهد و مصرف آب را در شرایط منابع محدود کاهش دهد (چنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ شو و همکاران، ۲۰۲۵).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اعمال کم‌آبیاری نسبی می‌تواند رشد ریشه و عملکرد حجمی گیاه را تا حدی کاهش دهد، اما هم‌زمان باعث افزایش غلظت قند و کیفیت محصول و بهره‌وری آب می‌شود؛ به عبارت دیگر، این روش نوعی مبادله بین عملکرد مطلق و بهره‌وری آب ایجاد می‌کند؛ گیاه ممکن است کمی کوچک‌تر باشد، اما نسبت تولید به آب مصرفی بالاتر می‌رود (کی‌یماز و ارتک، ۲۰۱۵).

با این حال، بیشتر مطالعات تنها یک شاخص منفرد مانند عملکرد محصول یا بهره‌وری آب را ارزیابی می‌کنند و نمی‌توانند ماهیت چندبعدی مدیریت آبیاری در شرایط واقعی مزرعه را به‌طور کامل منعکس کنند. مدیریت آب در مزرعه تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله تنش‌های

1 - Water Productivity

محیطی، پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه و کیفیت محصول قرار دارد؛ از این‌رو، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای دستیابی به تصمیم‌های بهینه در مدیریت آبیاری ضروری است (هاجکویچ و هیگینز، ۲۰۰۸؛ بهزادین و همکاران، ۲۰۱۲).

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[2] (MCDM)، مانند روش تاپسیس[3] (TOPSIS) (تکنیک رتبه‌بندی بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل)، امکان ارزیابی هم‌زمان چندین معیار را که ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند (مانند عملکرد ریشه، عملکرد شکر و بهره‌وری آب) فراهم می‌کند (بهزادین و همکاران، ۲۰۱۲؛ هاجکویچ و هیگینز، ۲۰۰۸).

این رویکرد در سال‌های اخیر به‌طور موفقیت‌آمیز در حوزه‌هایی مانند ارزیابی تناسب اراضی، انتخاب محصول و مدیریت آبیاری در کشاورزی به‌کار رفته و نشان داده است که نسبت به روش‌های آماری متداول، تصمیم‌گیری دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهد (ساری و کی‌یماز، ۲۰۲۱؛ شیچه و همکاران، ۲۰۲۱).

چغندرقند رقم شکوفا یکی از ارقام اصلاح‌شده داخلی است که به‌دلیل پتانسیل عملکرد بالا، درصد قند مناسب و سازگاری نسبی با شرایط اقلیمی مناطق مرکزی ایران مورد توجه قرار گرفته و در برخی مناطق کشت پاییزه و بهاره توصیه شده است. با توجه به گسترش تنش‌های محیطی، به‌ویژه کمبود منابع آب و افزایش فراوانی دوره‌های خشکسالی در مناطق تولید چغندرقند، ارزیابی واکنش این رقم به سطوح مختلف تنش خشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو بررسی تحمل آن به تنش خشکی و سنجش عملکرد کمی و کیفی و بهره‌وری آب آن تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری، گامی ضروری در جهت بهینه‌سازی مصرف آب و پایداری تولید در شرایط اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود.

برای پاسخ به این نیاز پژوهشی، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه تکنیک تاپسیس، در کنار تحلیل حساسیت وزن معیارها، ابزار مناسبی برای ارزیابی و رتبه‌بندی تیمارهای مختلف آبیاری فراهم می‌کند. این رویکرد به پژوهشگران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا نه تنها عملکرد نهایی تیمارهای آبیاری را مقایسه کنند، بلکه ثبات و حساسیت نتایج نسبت به وزن‌دهی معیارهای مختلف را نیز بسنجند.

بنابراین، هدف این مطالعه بررسی اثر تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری بر عملکرد و مقاومت به خشکی رقم چغندرقند شکوفا با استفاده از روش تاپسیس و تحلیل حساسیت وزن معیارها است تا بتوان راهبردهای علمی و عملی برای مدیریت بهتر آب در زراعت چغندرقند ارائه داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

این پژوهش در طول دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۶) در مزرعه‌ای واقع در ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور در شهرستان کرج انجام گرفت. موقعیت جغرافیایی مزرعه ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی است. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، منطقه از اقلیم گرم و خشک برخوردار است که با تابستان‌های خشک و گرم و زمستان‌های سرد مشخص می‌شود (متکان و همکاران، ۲۰۱۲). داده‌های اقلیمی بلندمدت برای دوره ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰ 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 (سازمان هواشناسی ایران، ۲۰۲۱).

2- Multi-Criteria Decision Making

3- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

ویژگی‌های خاک و آب محل آزمایش

نمونه‌های خاک از عمق‌های ۳۰–۰ و ۶۰–۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت بر اساس استاندارد توصیه شده توسط جی و بادر (۱۹۸۶) در آزمایشگاه انجام شد. جرم مخصوص ظاهری به‌روش نمونه‌گیری دست‌نخورده و از نسبت جرم خاک خشک بر حجم کل تر خاک تعیین گردید. رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه – صفحات و غشاء فشاری اندازه‌گیری شد و آب قابل استفاده گیاه از تفاضل رطوبت پژمردگی دائم از رطوبت ظرفیت زراعی به دست آمد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ فائو، ۲۰۰۳). نمونه‌های خاک، ابتدا در معرض فشار ۳۳ کیلوپاسکال (۳/۳ بار) برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و سپس فشار ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (۱۵ بار) برای تعیین رطوبت نقطه پژمردگی دائم قرار داده شدند. لایه سطحی خاک دارای هدایت الکتریکی، کربن آلی و نیتروژن کل بیشتری نسبت به زیرسطح بود، درحالی‌که 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.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and Chemical Properties of Soil

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	رطوبت وزنی ظرفیت زراعی Field capacity gravimetric moisture (٪)	رطوبت وزنی نقطه پژمردگی Wilting point gravimetric moisture (٪)	جرم مخصوص ظاهری Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	هدایت الکتریکی Electrical conductivity ($dS\ m^{-1}$)	کربن آلی Organic carbon (٪)	نیتروژن کل Total nitrogen (٪)	فسفر قابل جذب Available phosphorus ($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم قابل جذب Available potassium ($mg\ kg^{-1}$)
0–30	Loam	19.2	9.5	1.52	0.72	0.55	0.06	7.2	230
30–60	Loam	18.8	8.5	1.58	0.58	0.41	0.05	6.8	220

نتایج تجزیه کیفی آب آبیاری (جدول ۲) نشان داد که هدایت الکتریکی (EC) آب کمتر از حد آستانه سه دسی‌زیمنس بر متر برای چغندرقند بود و نشان‌دهنده عدم وجود مشکل شوری در آبیاری این محصول بود (آیرز و وست‌کات، ۱۹۸۵). همچنین اسیدیته آب و نسبت جذب سدیمی آب در محدوده مناسب قرار داشت که خطر سدیمی شدن خاک را کاهش داده و برای رشد ریشه و سلامت خاک مطلوب بود. غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها نیز در محدوده مجاز برای آبیاری چغندرقند قرار داشت (فائو، ۲۰۰۳).

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 2 – Chemical Characteristics of Irrigation Water

اسیدیته Acidity	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity ($dS\ m^{-1}$)	نسبت جذب سدیم Sodium Adsorption Ratio (SAR)	سدیم Sodium ($meq\ L^{-1}$)	کلسیم Calcium	منیزیم Magnesium	سولفات Sulfate	کلر Chloride	بی‌کربنات Bicarbonate
7.5	0.56	0.35	0.5	3.9	0.2	0.6	0.7	3.3

طرح آزمایشی

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار آبیاری و چهار تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی بر اساس حد مجاز تخلیه رطوبت خاک[4] (MAD) تعریف شدند. حد مجاز تخلیه رطوبت خاک به درصدی از آب قابل استفاده گیاه در ناحیه توسعه ریشه گفته می‌شود که می‌تواند قبل از آبیاری بعدی تخلیه شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). حد مجاز تخلیه رطوبت خاک ابزاری عملی برای ایجاد تعادل بین عملکرد محصول و بهره‌وری آب است (فائو، ۲۰۰۳). بر اساس توصیه منابع علمی، حد

4- Maximum Allowable Depletion

مجاز تخلیه رطوبت خاک (MAD) برای چغندرقند حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد آب قابل استفاده خاک است (مبیدی و کریمی، ۲۰۲۰؛ ژنگ و وانگ، ۲۰۲۱).

به‌منظور ایجاد طیف وسیعی از شرایط تنش آبی، از "تنش سبک" تا "تنش شدید" و امکان ارزیابی دقیق‌تر تعاملات گیاهی با محیط، سه سطح حد مجاز تخلیه رطوبت خاک (T_1=40%، T_2=60% و T_3=80%) به‌عنوان تیمارهای آبیاری انتخاب شدند.

عملیات زراعی

کشت چغندرقند در هر دو سال در مزرعه‌ای به مساحت ۱۲۰۰ مترمربع انجام شد. ابعاد کرت‌ها ۳ × ۲ متر، فاصله ردیف‌های کشت از هم ۵۰ سانتی‌متر و تراکم کشت ۸۰ هزار بوته در هکتار بود. کرت‌ها حداقل دو متر از همدیگر فاصله داشتند. کشت در اردیبهشت‌ماه هر سال به‌صورت دستی انجام شد و کوددهی شامل مصرف پایه ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل در هکتار قبل از کشت و ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار بود (فائو، ۲۰۰۳). کوددهی نیتروژنه با استفاده از اوره در سه مرحله سرک اعمال گردید. مرحله اول شامل ۴۰ کیلوگرم در هکتار در زمان ۴–۶ 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. این روش مرحله‌بندی کود نیتروژنه مطابق با توصیه‌های فائو (۲۰۰۳) و مطالعات مرجع و هدف آن افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن و کاهش اثرات منفی شسته شدن و تبخیر نیتروژن در طول فصل رشد چغندرقند بود. سایر عملیات معمول زراعی از جمله تنک‌کردن، وجین و مبارزه با آفات در طول دوره رشد انجام شد. آبیاری با توجه به تیمارهای حد مجاز تخلیه رطوبت خاک و با پایش رطوبت خاک ناحیه توسعه ریشه توسط نوترون‌متر انجام گردید. حجم آب ورودی به هر کرت با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد. برداشت به‌صورت دستی در اوایل آذر انجام شد و از هر کرت تعداد ۱۰ نمونه ریشه چغندرقند از ردیف‌های میانی برداشت شد تا اثر حاشیه حذف شود. نمونه‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات کمی و کیفی محصول و محاسبه بهره‌وری آب آماده شدند.

تعیین تبخیر–تعرق واقعی چغندرقند (ET_a)

برای اندازه‌گیری تبخیر–تعرق واقعی چغندرقند با سه حد تخلیه مجاز رطوبت خاک ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ ابتدا آب قابل استفاده گیاه[5] (TAW) از اختلاف بین ظرفیت زراعی[6] (FC) و نقطه پژمردگی دائم[7] (PWP) در هر متر خاک محاسبه شد:

$$TAW=FC-PWP \quad (۱)$$

هرگاه کسری رطوبت خاک[8] (Dr) در ناحیه مؤثر عمق توسعه ریشه (۶۰ سانتی‌متر) (اختلاف بین رطوبت نقطه زراعی با رطوبت زمان آبیاری) کمتر یا مساوی MAD × TAW بود، مقدار ETa برابر تبخیر –تعرق پتانسیل (ETc) در نظر گرفته شد:

$$ET_a=ET_c \quad \text{if} \quad D_r \le MAD \times TAW \quad (۲)$$

$$ET_a = ET_c * (1 - \frac{D_r-(MAD*TAW)}{TAW-(MAD*TAW)}) \quad (۳)$$

مقادیر رطوبتی و تبخیر–تعرق در این تحقیق بر حسب میلی‌متر آب در عمق مؤثر ریشه بیان شده‌اند. این روش امکان ارزیابی اثر سطوح مختلف محدودیت آب بر تبخیر–تعرق واقعی چغندرقند را فراهم کرد (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

در غیر این صورت، ETa با استفاده از رابطه زیر اصلاح شد:

تعیین تبخیر–تعرق پتانسیل چغندرقند (ETc)

برای اندازه‌گیری تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه (ETc) از لایسیمتر زهکش‌دار و معادله بیلان آب استفاده شد.

$$ETc = I + R - D - D_{rz}(\theta_i - \theta_f) \quad (۴)$$

5- Total Available Water
6- Field Capacity
7- Permanent Wilting Point
8- Root Zone Depletion

در این رابطه ETc: تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (mm)، I: عمق آب آبیاری (mm)، R: مقدار بارندگی (mm)، D: تلفات عمقی (mm)، D_{rz}: عمق توسعه ریشه (mm)، θ_f: رطوبت حجمی خاک در انتهای دوره موردنظر ($mm\ m^{-1}$)، θ_i: رطوبت حجمی خاک در ابتدای دوره موردنظر ($mm\ m^{-1}$) است.

عمق آبیاری (I) در هر نوبت بر اساس کسری آب خاک در ناحیه ریشه و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Allen et al., 1998):

$$I = (FC - \theta) * Z_r \qquad (۵)$$

که در آن:

I : عمق آب آبیاری (mm)

FC : رطوبت خاک در ظرفیت زراعی ($mm\ m^{-1}$)

θ : رطوبت خاک قبل از آبیاری ($mm\ m^{-1}$)

Zr : عمق مؤثر ریشه (m)

آبیاری لایسیمتر پس از تخلیه حدود ۲۰ درصد از آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه انجام شد. این سطح از رطوبت خاک بر اساس نتایج مطالعات لایسیمتری مشابه، به‌عنوان نقطه بهینه برای حفظ شرایط بدون تنش و جلوگیری از تلفات زه‌آبی انتخاب شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ هاول و همکاران، ۱۹۹۱).

داده‌های بارش (R) مورد استفاده در این مطالعه از ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت اخذ شد و در محاسبات بیلان آب لحاظ گردید. به دلیل عمق زیاد لایسیمتر نسبت به عمق ریشه، لایه‌های زیر ریشه مانند یک مخزن عمل کردند و تنها در زمان آبیاری زیاد، زه‌آب محدودی ایجاد شد که به‌طور منظم جمع‌آوری و در محاسبات بیلان آب لحاظ گردید. رطوبت خاک در ناحیه ریشه مؤثر با استفاده از نوترون‌متر پایش گردید و تغییرات ذخیره آب از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد.

برای تعیین عمق مؤثر ریشه با فرض عمق نهایی ۰/۶ متر، در اوایل فصل رشد عمق مؤثر ریشه ۳۰ درصد عمق نهایی در نظر گرفته شد. در اواسط رشد ۶۰ درصد طول عمق نهایی و در مرحله پایانی رشد ۱۰۰ درصد طول عمق نهایی ریشه به‌عنوان عمق مؤثر ریشه در نظر گرفته شد که در آن کمبود رطوبت به‌طور کامل جبران شده و نیمرخ ریشه تا ظرفیت زراعی پر می‌شد. به‌منظور کاهش خطای ناشی از فرض افزایش خطی عمق مؤثر ریشه، پس از برداشت محصول با تعیین عمق نهایی ریشه، تغییرات توسعه ریشه در طول فصل رشد با استفاده از معادله غیرخطی گریمز و یامادا (۱۹۸۲) شبیه‌سازی و نیاز آبی بر این اساس مجدداً محاسبه گردید.

بهره‌وری آب (WP)

بهره‌وری آب عملکرد ریشه و قند خالص بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$WP = \frac{Y}{ET_a} \qquad (۶)$$

که در آن WP بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، Y عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) و ETa تبخیر-تعرق واقعی در طول دوره رشد (مترمکعب در هکتار) است (پایرو و همکاران، ۲۰۰۶؛ دورنبوس و کسام، ۱۹۷۹).

درصد قند خالص

درصد قند خالص (WSC) از تفاضل درصد قند ناخالص (SC) و درصد قند ملاس (MS) به دست آمد (پولاچ، ۱۹۸۴).

$$WSC = (SC\% - MS\%) \qquad (۷)$$

درصد قند ناخالص (عیار قند)

درصد قند ناخالص (عیار قند)، از جمع درصد قند خالص با درصد قند ملاس به دست آمد.

قند ملاس

برای محاسبه قند ملاس (MS) از رابطه زیر استفاده گردید (دوتون و باولیر، ۱۹۸۴).

$$MS = 0.343(Na + K) + 0.094N - 0.29 \qquad (۸)$$

در این رابطه:

Na: مقدار سدیم برحسب میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم ریشه چغندرقند

K: مقدار پتاسیم برحسب میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم ریشه چغندرقند

N: مقدار نیتروژن برحسب میلی اکی‌والان در ۱۰۰ گرم ریشه چغندرقند

ضریب استحصال قند

ضریب استحصال قند از ریشه (ECS) از نسبت درصد قند خالص (WSC) به درصد قند ناخالص (SC) محاسبه شد.

$$\mathrm{ESC} = \frac{\mathrm{WSC}}{\mathrm{SC}} \qquad (۹)$$

آلکالیته (ضریب قلیائیت)

آلکالیته نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس ناخالصی‌های موجود در ریشه و از رابطه پولاچ (۱۹۸۴) محاسبه شد.

$$\mathrm{ALC} = \frac{(\mathrm{Na}+\mathrm{K})}{\mathrm{N}} \qquad (۱۰)$$

تحلیل اقتصادی

برای تعیین ارزش اقتصادی محصول تولیدی، نسبت منفعت به هزینه برای هر تیمار محاسبه شد. هزینه‌های کل تیمارهای مختلف شامل هزینه‌های ثابت (مثل کود، بذرف ماشین آلات، نیروی انسانی و ... بدون در نظر گرفتن هزینه آب) بود. هزینه ثابت برای کشت یک هکتار چغندرقند ۳۰۰ میلیون ریال، قیمت هر مترمکعب آب با کاربری کشاورزی ۴۰۰ ریال و قیمت خرید تضمینی یک کیلوگرم ریشه چغندرقند تولیدی از کشاورزان مبلغ ۵۲۰۰۰ ریال در نظر گرفته شد. این قیمت‌ها، مطابق با تعرفه مصوب سازمان آب و فاضلاب کشور برای سال ۱۴۰۳ و بر اساس دستورالعمل‌ها و برآوردهای سازمان جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در نظر گرفته شد.

تجزیه‌وتحلیل آماری و رتبه‌بندی تیمارها

با توجه به ماهیت طرح آزمایشی (اجرا در دو سال متوالی) و برای افزایش قدرت آماری و قابلیت تعمیم نتایج، داده‌های مربوط به صفات اندازه‌گیری‌شده با استفاده از آنالیز واریانس مرکب در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و بر اساس مدل اثرات ثابت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این آنالیز، سال و تکرار در سال به عنوان اثرات تصادفی در نظر گرفته شدند. اگرچه آزمون F معنی‌دار بودن اثر متقابل سال در تیمار را برای برخی صفات نشان داد، اما از آنجا که هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به یک الگوی کلی و کاربردی از پاسخ چغندرقند به رژیم‌های مختلف آبیاری و ارائه توصیه‌های مدیریتی با قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتر بود، و همچنین اثر اصلی تیمارها برای کلیه صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود، مقایسه میانگین تیمارها بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس مرکب انجام شد. این رویکرد با ادغام تغییرپذیری بین‌سالها، امکان ارائه یک نتیجه‌گیری جامع‌تر و پایدارتر را فراهم می‌کند. تجزیه واریانس با استفاده از مدل خطی عمومی و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح پنج درصد در نرم‌افزار SAS 9.4 انجام گرفت.

برای رتبه‌بندی تیمارهای آبیاری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS استفاده شد. این روش یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که امکان رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل را فراهم می‌کند (هوانگ و یون، ۱۹۸۱؛ بهزادیان و همکاران، ۲۰۱۲). این روش امکان ارزیابی هم‌زمان چندین معیار بالقوه و متضاد، مانند افزایش عملکرد و بهبود بهره‌وری آب را فراهم می‌کند. روش تاپسیس به‌طور گسترده در حوزه‌هایی مانند مدیریت منابع آب، انتخاب سناریوها و ارزیابی گزینه‌های چندهدفه کاربرد دارد و از حساسیت نسبت به وزن معیارها در مطالعات تصمیم‌گیری پشتیبانی می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۳).

ارزیابی و انتخاب بهترین گزینه (تیمار آبیاری) بر اساس نه معیار کلیدی ماتریس تصمیم (جدول ۳) انجام شد. این معیارها شامل تبخیر-تعرق، عملکرد ریشه، عملکرد شکر، ارزش اقتصادی محصول تولیدی، بهره‌وری آب ریشه، بهره‌وری آب شکر، درصد قند خالص، ضریب استحصال قند و ضریب آلکالیته بود. معیارهای تبخیر-تعرق

و ضریب آلکالیته از نوع «منفی‌گرا» (مقدار کمتر، بهتر) و سایر معیارها از نوع «مثبت‌گرا» (بیشتر، بهتر) در نظر گرفته شدند. به‌دلیل کمبود اطلاعات کیفی برای تعیین وزن‌های نسبی معیارها و جهت حفظ بی‌طرفی در اولین مرحله تحلیل، وزن‌ها به‌صورت یکنواخت (برابر) در نظر گرفته شدند، یعنی هر معیار وزن نسبت ۱ به ۹ (۰/۱۱۱) را دریافت کرد.

مراحل اجرای این روش شامل استانداردسازی ماتریس تصمیم، وزن‌دهی به معیارهای استانداردشده، تعیین راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^+) و ایده‌آل منفی(A^-)، محاسبه فاصله‌های اقلیدسی هر گزینه از این دو راه‌حل مرجع، و در نهایت محاسبه شاخص نزدیکی نرمال‌شده (C_i) می‌باشد. در این فرآیند، گزینه‌ای که بالاترین مقدار شاخص نزدیکی (C_i)را کسب کند، به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب می‌شود. شاخص نزدیکی برای هر تیمار بر اساس رابطه مشخصی محاسبه و رتبه آن تعیین گردید.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \qquad (۱۱)$$

که در آن (d_i^+) و (d_i^-) به‌ترتیب فاصله تیمار از ایده‌آل مثبت و منفی هستند.

جدول ۳- ماتریس تصمیم‌گیریِ تحلیل چندمعیاره

Table 3- Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Decision Matrix

گزینه‌ها Options	معیارها Criteria								
	تبخیر – تعرق ET (Evapotranspiration) ($m^3\ ha^{-1}$) (–)	عملکرد ریشه Root yield ($t\ ha^{-1}$) (+)	عملکرد شکر Sugar yield ($t\ ha^{-1}$) (+)	ارزش اقتصادی محصول تولیدی Economic value of produced crop (+)	بهره‌وری آب ریشه Water productivity (root) ($Kg\ m^{-3}$) (+)	بهره‌وری آب شکر Water productivity (sugar) ($Kg\ m^{-3}$) (+)	درصد قند خالص Net sugar content (٪) (+)	ضریب استحصال قند (بی‌بعد) Sugar recovery coefficient (+)	ضریب آلکالیته (بی‌بعد) Alkali coefficient (–)
T_1	8805	44.5	4.75	7.62	5.05	0.539	10.68	0.81	3.22
T_2	7493	40.9	4.42	7.02	5.44	0.589	10.82	0.79	2.82
T_3	4984	30.5	3.48	5.25	6.11	0.697	11.44	0.77	2.41

تحلیل حساسیت پایداری رتبه‌بندی گزینه‌ها (تیمارهای آبیاری)

برای سنجش پایداری نتایج در برابر عدم قطعیت در اولویت‌دهی معیارها، تحلیل حساسیت بر اساس روش مونت‌کارلو اجرا شد. در این تحلیل، وزن‌های معیارها به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۰/۰۹۹ , ۰/۱۲۳] (یعنی ±۱۰٪ حول مقدار متوسط ۰/۱۱۱) نمونه‌برداری شدند، به‌گونه‌ای که مجموع وزن‌ها دقیقاً برابر با یک باشد. در نهایت، ۱۰۰۰۰ تکرار مونت‌کارلو انجام و در هر تکرار، شاخص نزدیکی برای سه گزینه محاسبه و فراوانی برنده شدن هر گزینه به‌عنوان معیار پایداری در نظر گرفته شد. تمام مراحل با استفاده از کتابخانه‌های numpy، scipy و pandas در محیط پایتون پیاده‌سازی شد.

نتایج و بحث

تجزیه‌وتحلیل آماری

نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات کمی و کیفی چغندرقند (جدول ۴) نشان داد که اثر سال بر اغلب صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. به‌طوری‌که سال در سطح یک درصد بر عملکرد ریشه، عملکرد شکر خالص، تبخیر–تعرق، درصد قند خالص و بهره‌وری آب ریشه اثر معنی‌دار داشت و بر ضریب استحصال، آلکالیته و بهره‌وری آب شکر خالص در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. این نتایج بیانگر تأثیر قابل توجه شرایط اقلیمی متفاوت دو سال آزمایش بر فرآیندهای رشد، تجمع ماده خشک، کیفیت قند و الگوی مصرف آب گیاه است. معنی‌داری اثر سال به‌ویژه برای تبخیر–تعرق نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی سالانه نقش

مهمی در میزان مصرف آب و پاسخ فیزیولوژیکی گیاه داشته است.

اثر تیمارهای آبیاری نیز بر تمامی صفات بررسی‌شده معنی‌دار بود؛ به‌طوری‌که عملکرد ریشه، عملکرد شکر خالص، تبخیر–تعرق، درصد قند خالص، ضریب استحصال، بهره‌وری آب ریشه و بهره‌وری آب شکر خالص در سطح یک درصد و آلکالیته در سطح پنج درصد تحت تأثیر تیمار قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت آبیاری نه‌تنها بر عملکرد کمی (وزن ریشه و عملکرد شکر) بلکه بر شاخص‌های کیفی و بهره‌وری آب نیز اثر تعیین‌کننده داشته است. افزایش یا کاهش شدت تنش آبی از طریق تغییر در حد مجاز تخلیه رطوبت خاک توانسته است هم‌زمان پارامترهای فیزیولوژیک مرتبط با کیفیت قند و بهره‌وری آب را تعدیل کند که اهمیت انتخاب سطح بهینه آبیاری را برجسته می‌سازد.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب برخی صفات کمی و کیفی چغندرقند

Table 4- Composite Analysis of Variance (ANOVA) of Some Quantitative and Qualitative Traits of Sugar Beet

تغییرات منابع Source of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares							
		عملکرد ریشه Root yield	عملکرد شکر خالص Pure sugar yield	تبخیر –تعرق Evaporation–transpiration	درصد قند خالص Percent pure Sugar	ضریب استحصال قند Sugar recovery coefficient	آلکالیته Alkali coefficient	بهره‌وری آب ریشه Water productivity (root)	بهره‌وری آب شکر خالص Water productivity (pure sugar)
سال Year	1	354.2 **	2.66 **	13423.3 **	1.47 **	0.00034 *	17.92 *	3.95 **	0.024 *
بلوک Block	3	2.08	0.06	1.73	0.031	0.00008	0.069	0.08	0.0014
تیمار Treatment	2	422.2 **	3.48 **	301594.1 **	1.33 **	0.0027 **	1.3 *	2.32 **	0.053 **
بلوک (سال) Year × Block	3	1.92	0.025	63.5	0.041	0.00002	0.015	0.066	0.001
سال در تیمار Year × Treatment	2	3.71 ns	0.103 ns	1311.1 **	0.244 ns	0.00009 ns	0.18 ns	0.452 *	0.0035 *
خطا Error	12	2.44	0.044	86.9	0.113	0.00017	0.32	0.071	0.0008
ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)		4.05	4.96	31.1	3.07	1.63	20.1	10.8	4.71

ns، ** و * به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی غیرمعنادار بودن و معناداری در سطح یک و پنج درصد

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

اثر بلوک و همچنین اثر بلوک در سال برای هیچ‌یک از صفات معنی‌دار نبود که نشان‌دهنده یکنواختی مناسب شرایط آزمایش و کنترل مطلوب عوامل مزاحم در مزرعه است. برهم‌کنش سال در تیمار برای بیشتر صفات از جمله عملکرد ریشه، عملکرد شکر خالص، درصد قند خالص، ضریب استحصال و آلکالیته غیرمعنی‌دار بود که بیانگر پایداری نسبی پاسخ این صفات به تیمارهای آبیاری در دو سال آزمایش است. با این حال، این برهم‌کنش برای تبخیر–تعرق در سطح یک درصد و برای بهره‌وری آب ریشه و بهره‌وری آب شکر خالص در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه روند کلی پاسخ عملکرد و کیفیت نسبتاً پایدار بوده است، اما شاخص‌های مرتبط با مصرف و بهره‌وری آب تحت تأثیر شرایط سالانه تغییر کرده‌اند و واکنش آن‌ها به تیمارهای آبیاری تا حدی وابسته به شرایط اقلیمی هر سال بوده است. ضرایب تغییرات برای اغلب صفات در دامنه قابل قبول

آزمایش‌های مزرعه‌ای قرار داشتند. مقادیر پایین ضریب تغییرات برای عملکرد ریشه (۴/۰۵ درصد)، عملکرد شکر خالص (۴/۹۶ درصد)، درصد قند خالص (۳/۰۷ درصد) و ضریب استحصال (۱/۶۳ درصد) نشان‌دهنده دقت مناسب آزمایش و یکنواختی داده‌هاست. در مقابل، تبخیر–تعرق (۳۱/۱ درصد) و آلکالیته (۲۰/۱ درصد) ضرایب تغییرات بالاتری داشتند که می‌تواند ناشی از حساسیت این صفات به نوسانات محیطی و شرایط اقلیمی باشد. در مجموع، نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد که تیمارهای آبیاری اعمال‌شده تأثیر معنی‌دار و گسترده‌ای بر عملکرد، کیفیت قند و شاخص‌های بهره‌وری آب در رقم شکوفا داشته‌اند و در عین حال، پاسخ اغلب صفات از پایداری نسبی در دو سال برخوردار بوده است؛ بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده میان تیمارهای آبیاری از نظر آماری معتبر بوده و می‌تواند مبنای مناسبی برای رتبه‌بندی و انتخاب تیمار بهینه در تحلیل‌های چندمعیاره بعدی قرار گیرد.

نتایج مقایسه میانگین مرکب (جدول ۵) نشان داد که تیمارهای آبیاری اثرات متفاوت و معناداری بر عملکرد کمی، کیفیت قند و شاخص‌های بهره‌وری آب داشته‌اند. در بین تیمارها، تیمار T_1 بیشترین عملکرد ریشه (۴۴/۵ تن در هکتار) و عملکرد شکر خالص (۴/۷۵ تن در هکتار) را به خود اختصاص داد و از نظر آماری در گروه a قرار گرفت. این تیمار همچنین بیشترین میزان تبخیر–تعرق (۸۸۰۵ مترمکعب در هکتار) و بالاترین ضریب استحصال (۰/۸۱) را نشان داد. با این حال، درصد قند خالص در این تیمار (۱۰/۶۸ درصد) نسبت به تیمارهای دیگر کمتر بود و کمترین مقادیر بهره‌وری آب ریشه (۵/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و بهره‌وری آب شکر خالص (۰/۵۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب) نیز در این تیمار مشاهده شد. این نتایج بیانگر آن است که اگرچه تأمین کامل‌تر آب منجر به حداکثر تولید ماده خشک و شکر شده است، اما بهره‌وری آب در این شرایط کمتر بوده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین مرکب عملکرد ریشه، عملکرد شکر، مصرف آب و بهره‌وری آب تحت تیمارهای آبیاری

Table 5- Comparison of combined means of root yield, sugar yield, water consumption, and water productivity under irrigation treatments

تیمار/سال Treatment/Year	عملکرد ریشه Root yield ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد شکر خالص Pure sugar yield ($t\ ha^{-1}$)	تبخیر –تعرق Evapotranspiration ($m^3\ ha^{-1}$)	درصد قند خالص Percent pure sugar	ضریب استحصال Extraction coefficient	آلکالیته Alkalinity	بهره‌وری آب ریشه Water productivity of root ($kg\ m^{-3}$)	بهره‌وری آب شکر خالص Water productivity of pure sugar ($kg\ m^{-3}$)
T_1	44.5 a	4.75 a	8805 a	10.68 b	0.81 a	3.22 a	5.05 c	0.539 c
T_2	40.9 b	4.42 b	7493 b	10.82 a	0.79 b	2.82 ab	5.44 b	0.589 b
T_3	30.5 c	3.48 c	4984 c	11.44 a	0.77 c	2.41 b	6.11 a	0.697 a
سال اول Year 1	34.79 b	3.88 b	6858 b	11.23 a	0.794 a	3.68 a	5.13 b	0.580 b
سال دوم Year 2	42.48 a	4.55 a	7331 a	10.73 b	0.788 b	1.95 b	5.94 a	0.640 a

تیمار T_3 که بیشترین سطح تخلیه رطوبت خاک را تجربه کرده است، کمترین عملکرد ریشه (۳۰/۵ تن در هکتار) و عملکرد شکر خالص (۳/۴۸ تن در هکتار) را نشان داد، اما بالاترین درصد قند خالص (۱۱/۴۴ درصد)، بیشترین بهره‌وری آب ریشه (۶/۱۱ کیلوگرم بر متر مکعب) و بهره‌وری آب شکر خالص (۰/۶۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب) را به دست آورد. همچنین کمترین میزان تبخیر–تعرق (۴۹۸۴ متر مکعب در هکتار) مربوط به این تیمار بود. این الگو نشان‌دهنده وجود یک مبادله مشخص بین عملکرد مطلق و بهره‌وری آب است؛ به‌گونه‌ای که با افزایش سطح تخلیه رطوبت خاک، عملکرد کاهش‌یافته اما بهره‌وری استفاده از آب افزایش پیدا کرده است.

تیمار T_2 از نظر اکثر صفات در موقعیت میانی قرار گرفت؛ به‌طوری‌که عملکرد ریشه و شکر آن به‌طور

معنی‌داری کمتر از تیمار T_1 و بیشتر از تیمار T_3 بود. درصد قند خالص در این تیمار (۱۰/۸۲ درصد) نسبت به تیمار T_1افزایش یافت و بهره‌وری آب نیز بهبود نشان داد؛ بنابراین، تیمار T_2 نوعی تعادل نسبی بین حفظ عملکرد و افزایش بهره‌وری آب ایجاد کرده است که از منظر مدیریت بهینه آبیاری قابل توجه است.

عملکرد ریشه و عملکرد شکر در سال دوم افزایش معنی‌داری نسبت به سال اول به ترتیب به مقدار ۷/۶۹ و ۰/۶۷ تن در هکتار نشان داد. همچنین بهره‌وری آب ریشه و شکر خالص در سال دوم به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. در مقابل، درصد قند خالص و ضریب استحصال در سال اول به‌ترتیب ۴/۷ درصد و ۰/۷۶ درصد بالاتر گزارش شد. میزان تبخیر–تعرق نیز در سال دوم ۶/۹ درصد افزایش یافت.

سال‌های اول و دوم آزمایش از نظر شرایط آب–وهوایی با یکدیگر تفاوت‌هایی داشتند. دوره رشد در سال دوم (۲۶۴۴ درجه روز–رشد معادل ۱۸۶ روز) بیشتر از سال اول (۲۵۶۱ درجه روز–رشد معادل ۱۸۲ روز) بود. در سال اول (۱۳۹۶) مقدار بارندگی در طول دوره رشد ۱۵ میلی‌متر بود که عمدتاً در زمانی از دوره رشد به وقوع پیوست که یا قابل‌استفاده گیاه نبود و یا مقدار آن بسیار ناچیز بود. درحالی‌که در سال دوم (۱۳۹۷) در طول دوره رشد ۹۱/۴ میلی‌متر بارندگی داشتیم که هم‌زمان وقوع بارش‌ها و هم مقدار آن‌ها قابل‌توجه بود. از این مقدار بارش‌ها تقریباً ۱۰ میلی‌متر در زمان کاشت، پنج میلی‌متر مرداد و بقیه آن در مهر و آبان به وقوع پیوست. اگرچه متوسط مقادیر تبخیر–تعرق دو سال تفاوت زیادی باهم نداشتند، اما عملاً در سال دوم نسبت به سال اول، تیمارهای آبیاری در اوایل و اواخر فصل رشد با تنش کمتری مواجه شدند. شرایط متفاوت آب‌وهوایی، باعث تفاوت معنی‌دار در مقادیر تبخیر– تعرق دو سال شد. اختلاف قابل توجه آلکالیته بین دو سال (۳/۶۸ در سال اول در برابر ۱/۹۵ در سال دوم) نیز بیانگر تأثیر شرایط محیطی بر ویژگی‌های کیفی ریشه بود. در مجموع، نتایج جدول مقایسه میانگین نشان می‌دهد که افزایش تأمین آب منجر به حداکثرسازی عملکرد کمی می‌شود، در حالی که مدیریت با ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک ملایم تا متوسط می‌تواند با کاهش نسبی عملکرد، بهره‌وری آب و برخی شاخص‌های کیفی را بهبود دهد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره را برجسته می‌کند، زیرا انتخاب تیمار برتر تنها بر اساس عملکرد یا تنها بر اساس بهره‌وری آب نمی‌تواند تصویری جامع از مطلوبیت مدیریتی ارائه دهد.

اختلالات ناشی از تنش خشکی فیزیولوژی گیاه را در چندین سطح مختل می‌کنند و این اثرات به‌صورت مستقیم بر عملکرد کمی و کیفی محصول تأثیر می‌گذارند. از منظر فیزیولوژیکی، کاهش محتوای آب در بافت‌ها موجب محدود شدن باز و بسته شدن روزنه‌ها، کاهش تبادل گازها و کاهش فتوسنتز می‌شود که نهایتاً منجر به کاهش تجمع زیست‌توده و عملکرد می‌گردد (چاوز و اولیویرا، ۲۰۲۱؛ فاروق و همکاران، ۲۰۰۹). تنش خشکی همچنین جذب عناصر غذایی، انتقال کربوهیدرات‌ها به اندام ذخیره‌ای و رشد ریشه را محدود می‌سازد و باعث کاهش توسعه اندام‌های زیرزمینی می‌شود (بلوم، ۲۰۱۷؛ گوپتا و همکاران، ۲۰۲۱). از بعد کیفیت، کاهش جریان کربن به مسیرهای سنتز قند و تغییر در نسبت‌های متابولیکی می‌تواند منجر به کاهش درصد قند خالص و خلوص محصول شود (ماناوالان و همکاران، ۲۰۰۹).

مطالعات کاربردی در محصولات زراعی نشان داده‌اند که تحت شرایط کم‌آبیاری، علیرغم کاهش عملکرد مطلق، بسیاری از گونه‌ها بهره‌وری آب را حفظ یا حتی بهبود می‌دهند که نشان‌دهنده وجود مبادله‌ای میان عملکرد مطلق و بهره‌وری آب است (گرتس و رائس، ۲۰۰۹؛ موسیک و همکاران، ۱۹۹۴). نتایج این پژوهش همسو با یافته‌های کیردا (۲۰۰۲) در کاهش توسعه ریشه و افت عملکرد ریشه تحت تنش آبی است و با گزارش‌های کی‌یماز و ارتک (۲۰۱۵) از کاهش عملکرد همراه با افزایش نسبی بهره‌وری آب هم‌خوانی دارد. علاوه بر این، برخی مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تنش‌های ملایم تا متوسط

می‌تواند واکنش‌های سازگار فیزیولوژیک در گیاهان القا کند که منجر به افزایش نسبت تولید به آب مصرفی می‌شود، اگرچه اثر منفی بر مقادیر مطلق عملکرد باقی می‌ماند (تئولات و همکاران، ۲۰۰۱؛ سینکلر، ۲۰۱۱).

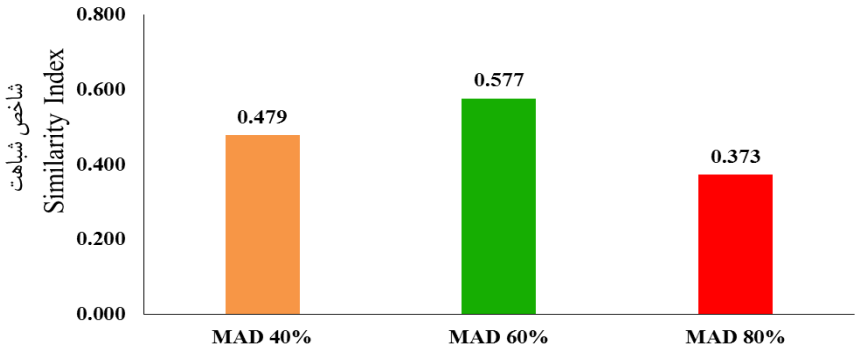
این الگوها نشان می‌دهند که کاهش مصرف آب در تیمارهای با مدیریت کم‌آبیاری واقعی، همراه با کاهش عملکرد و کیفیت محصول مشاهده می‌شود و اگرچه گیاه تحت تنش قرار دارد، بهره‌وری آب بهبود یافته است که می‌تواند گزینه مدیریتی مناسبی در شرایط محدودیت منابع آب باشد.

ارزش اقتصادی محصول تولیدی (ریشه چغندرقند)

بر اساس تحلیل اقتصادی، نسبت منفعت به هزینه (Benefit-Cost Ratio) برای تیمارهای مختلف آبیاری محاسبه شد. نتایج نشان داد که تیمار T_1 با نسبت منفعت به هزینه ۷/۶۲ دارای بالاترین بازده اقتصادی بود. تیمار T_2 با نسبت ۷/۰۲ در رتبه دوم قرار گرفت و تیمار T_3 با نسبت ۵/۲۵ کمترین بازده اقتصادی را نشان داد. این ارزیابی نشان می‌دهد که تیمار T_1، علیرغم مصرف آب بیشتر نسبت به T_2، از لحاظ اقتصادی مطلوب‌ترین گزینه است. از سوی دیگر، تیمار T_2 که از نظر شاخص‌های فنی و بهره‌وری آب به‌عنوان گزینه برتر شناسایی‌شده بود، در جایگاه دوم اقتصادی قرار گرفت. تیمار T_3 با پایین‌ترین نسبت منفعت به هزینه، از منظر اقتصادی توجیه‌پذیر نبوده و در شرایط مشابه توصیه نمی‌شود؛ بنابراین، در انتخاب تیمار آبیاری بهینه، لازم است میان اهداف فنی (بهره‌وری آب و عملکرد) و اهداف اقتصادی (بازده مالی) توازن ایجاد شود که این توازن با تحلیل چندمعیاره حاصل می‌شود.

شناسایی راهبرد آبیاری بهینه

بر اساس تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره به روش TOPSIS و با در نظر گرفتن هشت معیار فنی (شامل کمیت و کیفیت محصول، بهره‌وری آب و شاخص‌های مرتبط) به همراه معیار اقتصادی (نسبت منفعت به هزینه)، مقادیر شاخص نزدیکی (C_i) برای تیمارها با دقت سه رقم اعشار محاسبه شد. نتایج نشان داد که تیمار T2 (MAD=60%) با مقدار ۰/۵۷۷ بالاترین شاخص نزدیکی را به خود اختصاص داده است. پس از آن، تیمار T1 (MAD=40%) با مقدار ۰/۴۷۹ در رتبه دوم و تیمار T3 (MAD=80%) با مقدار ۰/۳۷۳ در رتبه سوم قرار گرفت. مطابق با منطق روش TOPSIS، که گزینه با مقدار C_i بزرگ‌تر را به‌عنوان گزینه برتر معرفی می‌کند، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها به‌صورت T2 > T1 > T3 تعیین گردید. این رتبه‌بندی نشان‌دهنده برتری معنادار تیمار T2 در ارزیابی تلفیقی معیارهای فنی و اقتصادی و تأکید بر آن به‌عنوان گزینه بهینه برای دستیابی به توازن مطلوب بین عملکرد، کیفیت، بهره‌وری آب و توجیه اقتصادی است (شکل ۱).



شکل ۱- رتبه‌بندی تیمارهای آبیاری به روش تاپسیس

Figure 1- Ranking of irrigation treatments using TOPSIS

مطالعات اخیر در حوزه مدیریت منابع آب تأیید می‌کنند که به‌کارگیری تاپسیس در کنار ابزارهای مدل‌سازی منابع آب می‌تواند رتبه‌بندی سناریوها را به شکلی مؤثر انجام دهد و راهبردهایی را که بیشترین سازگاری با اهداف توسعه پایدار دارند، شناسایی کند (هان و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، کاربردهای تاپسیس در مدیریت منابع آب در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که این روش توانایی در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به‌صورت هم‌زمان و کمک به شناسایی راهبردهای بهینه را دارد؛ به‌عنوان مثال، ترکیب تاپسیس با مدل‌های دیگری مانند "سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب"[9] (WEAP) در مطالعات موردی حوضه‌های آبریز، منجر به انتخاب سناریوهای بهینه آبیاری و افزایش ذخیره آب زیرزمینی شده است (روستا و عراقی‌نژاد، ۲۰۱۵). همچنین، در مطالعات تطبیقی بین تاپسیس و نسخه‌های توسعه‌یافته‌تر مانند تاپسیس فازی مشاهده شده است که روش‌های مبتنی بر تاپسیس در مدیریت تخصیص آب، به‌ویژه در شرایط عدم قطعیت داده‌ها و وزن‌ها، قابلیت انعطاف کافی دارند و می‌توانند گزینه‌های مناسب را با دقت و شفافیت رتبه‌بندی کنند (لی، ۲۰۲۵).

ارزیابی حساسیت رتبه‌بندی گزینه‌ها به تغییر وزن معیارها و عدم قطعیت وزن‌ها در تصمیم‌گیری چندمعیاره

تحلیل پایداری نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها به روش مونت کارلو نشان داد که تغییرات استاندارد شاخص‌ها بسیار ناچیز است (به‌طور مثال، انحراف معیار برای گزینه T_2 برابر با ۰/۰۰۱۵ است) که این خود بیانگر پایداری بالای رتبه‌بندی نسبت به نوسانات وزنی بود. از بین ۱۰۰۰۰ نمونه، گزینه T_2 در ۹۹۸۷ مورد (۹۹/۸۷ درصد) به‌عنوان بهترین گزینه شناخته شد، در حالی‌که گزینه T_1 تنها در ۱۳ مورد (۰/۱۳ درصد) و گزینه T_3 هیچ‌گاه برنده نبود. این یافته به‌وضوح تأیید می‌کند که برتری گزینه T_2، نه تنها در شرایط ایده‌آل (وزن‌های برابر) بلکه در مواجهه با عدم قطعیت در اولویت‌دهی معیار، به‌طور محکم و قابل‌اعتماد حفظ می‌شود. از منظر کاربردی، برتری نسبی گزینه T_2 عمدتاً ناشی از تعادل بهینه‌ای است که در معیارهای کمی و کیفی برقرار می‌کند. در حالی که بهره‌وری آب شکر خالص در تیمار T_2 (۰/۵۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب) و درصد قند خالص (۱۰/۸۲ درصد) در سطحی معنی‌دار و پایدار قرار دارند، تیمار T_3 با وجود بالاترین درصد قند خالص (۱۱/۴۴ درصد) و بهره‌وری آب شکر (۰/۶۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب)، دارای عملکرد ریشه و شکر خالص بسیار پایین‌تر (۳۰/۵ و ۳/۴۸ تن در هکتار) است یعنی افزایش درصد قند در تیمار T_3 با افت شدید در تولید کل شکر همراه بوده است. از این رو، در ترکیب کلی معیارها، تیمار T_2 نه تنها در عملکرد ریشه و شکر (به‌طور معنی‌داری) برتر است، بلکه با توجه به مصرف آب کمتر نسبت به تیمار T_1 و افت کمتر در عملکرد نسبت به تیمار T_3، گزینه‌ای متعادل و پایدار برای تصمیم‌گیری در شرایط عملیاتی فراهم می‌کند.

یافته‌های تحلیل مونت‌کارلو که پایداری نتایج را تأیید می‌کند، این نتیجه‌گیری را تقویت می‌نماید که انتخاب تیمار T_2 از نظر تصمیم‌گیری چندمعیاره، گزینه‌ای مطمئن و بهینه برای مواجهه با چالش‌های عملیاتی و اقتصادی است، به‌ویژه در شرایطی که هم بهره‌وری منابع و هم عملکرد نهایی محصول اهمیت دارند. یافته‌های این مطالعه نه تنها پایداری تیمار T_2 را به‌عنوان گزینه بهینه در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره تأیید می‌کند، بلکه آن را از دیدگاه فیزیولوژیکی، اقتصادی و پایداری محیطی تبیین می‌نماید. از نظر فیزیولوژیکی، این سطح تخلیه رطوبت خاک، تعادلی را بین حفظ فتوسنتز و کنترل تبخیر–تعرق برقرار می‌کند که به حداکثر رساندن ترکیب ساکارز در ریشه و جلوگیری از استرس شدید منجر می‌شود.

نتایج این مطالعه با یافته‌های پیشین در حوزه آبیاری چغندرقند به‌خوبی هماهنگی نشان می‌دهد و به‌طور متقن تأیید می‌کند که ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد به‌عنوان یک نقطه بهینه تعادلی (sweet spot) در

9- Water Evaluation And Planning System

شرایط نیمه‌خشک ایران عمل می‌کند. این امر با تحقیقات ژنگ و همکاران (۲۰۲۱) در چین که بالاترین بهره‌وری آب شکر را در ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی نزدیکی دارد؛ درصد قند خالص نیز تنها ۰/۶۲ درصد پایین‌تر از حداکثر ممکن (۱۰/۸۲ درصد در برابر ۱۱/۴۴ درصد در تیمار T_3) بود. از سوی دیگر، ال وابیل و همکاران (۲۰۱۴) در شرایط خشک عربستان، کاهش ۲۸ تا ۳۲ درصدی عملکرد ریشه و افت جزئی قند خالص به مقدار ۰/۳ تا ۰/۵ درصد را در مدیریت با ضریب تخلیه مجاز ۸۰ درصد مشاهده کرده‌اند. شبیه همان الگو (کاهش ۳۱/۵ درصدی) که در تیمار T_3 ما تکرار شده است و نشان‌دهنده این واقعیت است که با افزایش تنش آبی بیش‌ازحد، تراکم قند در ریشه افزایش و عملکرد کمی کاهش می‌یابد. از نظر اقتصادی، یافته مقدم و همکاران (۲۰۱۸) در اصفهان که ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد را به‌عنوان گزینه سودآورتر برای چغندرقند معرفی کرده بود، با یافته ما سازگار است. در نهایت، کرم و همکاران (۲۰۱۶) تأکید می‌کنند که تیمار بهینه به آب‌وهوای منطقه وابسته است: در شرایط خشک، ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۵۰ درصد مفیدتر است، اما در مناطق نیمه‌خشک با بارندگی تابستانی محدود (مانند کرج)، ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد بهترین گزینه است و این دقیقاً همان شرایطی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین، مجموعه یافته‌ها به‌وضوح حمایت می‌کند که تیمار T_2 نه تنها از نظر فیزیولوژیکی و اقتصادی، بلکه از نظر کاربردی و محیطی، بهینه‌ترین گزینه برای کشت چغندرقند در مناطق نیمه‌خشک ایران است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت آبیاری بر اساس ضرایب تخلیه مجاز رطوبت خاک تأثیر قابل توجهی بر عملکرد، کیفیت و بهره‌وری آب چغندرقند رقم «شکوفا» دارد. اعمال ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد، توانست تعادلی مطلوب بین کیفیت محصول و بهره‌وری منابع آبی ایجاد کند. تحلیل چندمعیاره تاپسیس همراه با تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که رتبه‌بندی این تیمار آبیاری در مواجهه با تغییر وزن معیارها و عدم قطعیت‌های شبیه‌سازی شده پایدار باقی می‌ماند. این یافته‌ها حاکی است که ضریب تخلیه مجاز رطوبت خاک ۶۰ درصد می‌تواند برای آبیاری این رقم در شرایط خشکی مورد استفاده قرار گیرد و امکان مدیریت بهینه منابع آب را بدون کاهش معنی‌دار کمیت و کیفیت محصول فراهم کند. مطالعات آینده می‌توانند اثر ضرایب مختلف تخلیه رطوبت خاک را در شرایط اقلیمی و خاک‌های متنوع بررسی کنند و ترکیب مدیریت آبیاری با تغذیه بهینه و ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی را ارزیابی نمایند. همچنین، بررسی اثرات بلندمدت بر سلامت خاک و شاخص‌های اقتصادی و استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف آب در مزرعه کمک کند.

تشکر و قدردانی

این مقاله که مستخرج از پروژه تحقیقاتی است با حمایت‌های مالی مؤسسه تحقیقات خاک و آب اجرا شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌ها و زحمات همکاران آن مؤسسه محترم تشکر و قدردانی می‌شود.

فهرست منابع

۱. متکان، عبدالرضا، درویش‌زاده، رضا، حسینی‌اصل، احمد، ابراهیمی‌خفسی، محمد و ابراهیمی‌خفسی، زهرا، ۱۳۹۱. خشکسالی‌پهنه‌بندی در مناطق خشک با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر دانش در محیط GIS (مطالعه موردی: شیتور، یزد). *فصلنامه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۲(۵–۶)، ۱۰۳–۱۱۶.

۲. سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۰. داده‌های اقلیم‌شناسی ایستگاه کرج (۲۰۲۰–۱۹۹۰). تهران، سازمان هواشناسی کشور

3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome.*
4. Al-Wabel, M. I., Al-Ghamdi, A. A., & Al-Garni, S. Z., 2014. Effect of deficit irrigation on sugar beet (Beta vulgaris L.) yield and water use efficiency under Saudi Arabian conditions. *Journal of Arid Environments*, 108, pp.62–68. **DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.05.006**
5. Ayers, R. S., & Westcot, D. W., 1985. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1. Rome*. **https://www.fao.org/3/t0234e/T0234E00.htm**
6. Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J., 2012. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), pp.13051–13069. **https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056**
7. Blum, A., 2017. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. *Plant, Cell & Environment*, 40(1), pp.4–10, **https://doi.org/10.1111/pce.12813**
8. Bodner, G., & Alsalem, W., 2023. Drought stress effects on root growth and sugar accumulation in Beta vulgaris L. *Agronomy*, 13(10), 2519. **https://doi.org/10.3390/agronomy13102519**
9. Chaves, M. M., & Oliveira, M. M., 2021. Mechanisms underlying plant resilience to drought: Effects on photosynthesis and crop productivity. *Journal of Experimental Botany*, 72(10), pp.3481–3499. **https://doi.org/10.1093/jxb/erab208**
10. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, S., Liao, Z., Zhang, F., & Wang, Y. A., 2021. Global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation. *Agricultural Water Management*, 248, 106778. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106778**
11. Chiche, J., Ferchichi, A., & Rhouma, A., 2021. Application of multi-criteria decision-making methods for irrigation management under water scarcity conditions. *Water*, 13(9), 1234. **https://doi.org/10.3390/w13091234**
12. Chieb, M., & Gachomo, E. W., 2023. The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC Plant Biology*, 23, Article 407. **https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8**
13. Doorenbos, J., & Kassam, A. H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome.*
14. Dutton, J. and Bowler, G., 1984. Money is still being wasted on nitrogen fertilizer. *British Sugar Beet Review*, 52(4), pp.74-77.
15. FAO. 2003. Deficit irrigation practices. Rome: **https://www.fao.org/4/Y3655E/y3655e03.htm**
16. FAO. 2003. Irrigation water quality guidelines. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. Rome*. **https://www.fao.org/3/y3674e/y3674e00.htm**
17. FAO. 2022. Water productivity in agriculture: From water savings to increased value. Rome.
18. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M., 2019. Drought stress in plants: An overview. *Plant Physiology and Biochemistry*, 147, pp.1–19. **https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.01.001**
19. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A., 2009. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), pp.185–212. **https://doi.org/10.1051/agro:2008021**
20. 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 edn. Madison, *Soil Science Society of America*, pp.383-411.

21. Geerts, S., & Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), pp.1275–1284. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.009**
22. Grimes, D. W., & Yamada, H., 1982. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential. *Crop Science*, 22(1), pp.134–139. **https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200010032x**
23. Gupta, A., Rico Machado, J. L., de Oliveira, A. C., & Sivasakthi, K., 2021. Physiological and molecular responses of plants under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, pp.90–105. **https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.032**
24. Hajkowicz, S., & Higgins, A., 2008. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*, 184(1), pp.255–265. **https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.045**
25. Han, F., Alkhawaji, R. N., & Shafieezadeh, M. M., 2025. Evaluating sustainable water management strategies using TOPSIS and fuzzy TOPSIS methods. *Applied Water Science*, 15, 4. **https://doi.org/10.1007/s13201-024-02336-7**
26. Howell, T. A., Schneider, A. D., & Jensen, M. E., 1991. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In R. G. Allen et al. (Eds.), Advances in evapotranspiration (pp.1–9). St. Joseph: ASAE.
27. Huang, I. B., Keisler, J., & Linkov, I., 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 409(19), pp.3578–3594. **https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022**
28. Hwang, C. L., & Yoon, K., 1981. Multiple attribute decision making: Methods and applications — A state of the art survey. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 186. Springer.
29. Karam, M. A., El-Hattab, A. M., & El-Baky, H. A., 2016. Response of sugar beet (Beta vulgaris L.) to different irrigation regimes under semi-arid conditions in Egypt. *International Journal of Agricultural Biology*, 18(4), pp.741–748. **DOI: 10.17957/IJAB/61832**
30. Kirda, C., 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. *In Deficit Irrigation Practices (FAO Water Report No. 22)*, pp.102–114. FAO.
31. Kiymaz, S., & Ertek, A., 2015. Yield and quality of sugar beet (Beta vulgaris L.) under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 152, pp.91–98. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.012**
32. Kordrostami, F., Nazari, M., & Jafari, M., 2026. Genotypic variability of sugar beet under water deficit conditions: Implications for sustainable production. *Scientific Reports*, 16, 33240. **https://doi.org/10.1038/s41598-025-33240-y**
33. Lee, W. K., 2025. Comparative study of TOPSIS and Fuzzy TOPSIS for the determination of water allocation in an urbanized river basin. *Journal of Advanced Research Design*, 144(1), pp.90–102.
34. Li, P., Wu, J., & Chen, J., 2013. Sensitivity analysis of TOPSIS method in water quality assessment: I. Sensitivity to the parameter weights. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, pp.2453–2461. **https://doi.org/10.1007/s10661-012-2723-9**
35. Liu, B., Dai, T., & Zhang, D., 2022. Climate change impacts on agricultural water management and crop productivity. *Journal of Agricultural Science*, 160(4), pp.547–560. **https://doi.org/10.1017/S0021859622000158**
36. Love, D. R., Smith, J., & Johnson, P., 2023. Quantity and quality changes in sugar beet (Beta vulgaris L.) induced by different sources of biostimulants. *Scientific Reports*. **https://www.nature.com/articles/s41598-023-42182-2**
37. Manavalan, L. P., Guttikonda, S. K., Phan Tran, L. S., & Nguyen, H. T., 2009. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology*, 50(7), pp.1260–1276. **https://doi.org/10.1093/pcp/pcp080**
38. Mobedi, A., & Karimi, H., 2020. Management allowed depletion (MAD) levels for deficit irrigation in sugar beet. *International Journal of Crop Sciences*, 18(3), pp.210–224.

39. Moghaddam, M., Najafi, A., & Khoshraftar, H. R., 2018. Evaluation of water productivity and economic return of sugar beet under different irrigation levels in central Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 20(5), pp.1027–1040.
40. Musick, J. T., Dusek, D. A., & Martin, D. L., 1994. Deficit irrigation for grain sorghum in the Southern High Plains. *Agronomy Journal*, 86(6), pp.934–941. **https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600060015x**
41. Payero, J. O., Melvin, S. R., & Irmak, S., 2006. Soybean and corn water productivity under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 83(3), pp.233–243. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.10.010**
42. Pollach, G., 1984. Tests on improvement of a rizomania diagnosis based on conventional beet analysis (Rhizomania, beet necrotic yellow vein virus). German. Zuckerindustrie.
43. Rinaldi, M., & Vonella, A., 2006. Water requirements and irrigation scheduling of sugar beet. *Agricultural Water Management*, 85(1–2), pp.15–24. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.002**
44. Rousta, B., & Araghinejad, S., 2015. Development of a multi-criteria decision making tool for a water resources decision support system. *Water Resources Management*, 29(15), pp.5713–5727. **https://doi.org/10.1007/s11269-015-1142-4**
45. Saremi, H., & Maknoon, R., 2020. Monte Carlo simulation for sensitivity analysis in TOPSIS: An agricultural water management case study. *Agricultural Water Management*, 240, 106303. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106303**
46. Sari, S., & Kiymaz, S., 2021. Evaluation of irrigation strategies using multi-criteria decision analysis methods. *Agricultural Water Management*, 243, 106447. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106447**
47. Sinclair, T. R., 2011. Challenges in breeding for increased water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(13), pp.4391–4402. **https://doi.org/10.1093/jxb/err141**
48. Teulat, B., Borries, C., & This, D., 2001. QTL analysis of stay-green in two recombinant inbred line populations of durum wheat. *Plant Physiology*, 125(1), pp.364–378. **https://doi.org/10.1104/pp.125.1.364**
49. Wang, Z., & Kong, D., 2025. The effect of irrigation and fertilization reduction on yield, quality, and resource use efficiency of drip fertilized sugar beet (Beta vulgaris L.) in Northern China. *Plants*, 14(4), 536. **https://doi.org/10.3390/plants14040536**
50. Xu, X., et al., 2025. Optimizing water-efficient agriculture: Evaluating sustainability of soil management and irrigation synergies using fuzzy extent analysis. Scientific Reports.
51. Zhang, Y., & Wang, L. (2021)., Optimization of irrigation scheduling for sugar beet based on soil moisture depletion levels. *Agricultural Water Management*, 250, 106789. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106789
52. Zhang, Y., Li, S., Wang, J., et al., 2021. Optimal irrigation scheduling for sugar beet under deficit irrigation: Yield, water use efficiency and economic returns. *Agricultural Water Management*, 247, 106689.