SBSI

Journal of Sugar Beet

Journal Home Page: https://jsb.areeo.ac.ir

ISCPBS
انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

Prioritization of sugar beet growth stages for sustainable water resource management using multi-criteria decision-making theory

Reza Mohammadikia[1*]

(Received: 10 May. 2026 ; Accepted: 13 July. 2026)

How to cite this article:
Mohammadikia, R. Prioritization of sugar beet growth stages for sustainable water resource management using multi-criteria decision-making theory. Journal of Sugar Beet. 2026: (41)2. 285-304. (In Persian with English abstract). **DOI: 10.22092/jsb.2026.372764.1405.**

Extended Abstract

Introduction

Efficient irrigation management is one of the most important challenges in sugar beet production, particularly under conditions of increasing water scarcity. Since the sensitivity of sugar beet to water deficit varies throughout its growth cycle, identifying the critical growth stages for water allocation can substantially improve water productivity while maintaining crop performance. Conventional irrigation scheduling generally treats all growth stages similarly and therefore may not maximize the efficiency of limited water resources. Multi-criteria decision-making (MCDM) techniques provide an effective framework for integrating multiple agronomic criteria into a single decision-making process. Among these methods, the VIKOR model is capable of identifying compromise solutions by simultaneously considering group utility and individual regret. Therefore, this study aimed to prioritize sugar beet growth stages for sustainable irrigation management using the VIKOR multi-criteria decision-making method based on biomass water productivity and the relative contribution of each growth stage to plant growth.

Materials and Methods

The study was conducted using data obtained from a two-year field experiment. Two evaluation criteria, including biomass water productivity (kg m^{-3}) and the relative growth share (%) of each growth stage, were used to construct the decision matrix. Four growth stages (Initial, Development, Mid-season, and Late-season) were considered as the decision alternatives. Criteria weights were determined using both equal weighting and Shannon entropy weighting approaches. The VIKOR method was then employed to rank the growth stages based on the S, R, and Q indices. The acceptable advantage and acceptable stability conditions proposed by Opricovic were evaluated to verify the validity of the compromise solution. Furthermore, sensitivity analysis based on systematic variation of criteria weights, together with Tornado analysis and Spearman rank correlation coefficient, was performed to assess the robustness and stability of the obtained rankings.

Results and discussion

The biomass accumulation pattern followed a typical sigmoid growth curve, with rapid dry matter accumulation occurring primarily during the development and mid-season stages. Mean biomass water productivity values for the Initial, Development, Mid-season, and late-season stages were 4.91, 8.66, 3.84 and 3.83 kg m^{-3}, respectively for the Initial, Development, Mid and Late stages, respectively, while their corresponding relative growth shares were 7.24, 45.99, 41.77 and 5.01%, respectively. Application of the VIKOR model indicated that the Development stage consistently ranked first with Q = 0.000, followed by the Mid (Q = 0.774), Initial (Q = 0.903), and Late (Q = 1.000) stages. Both acceptable advantage ($\Delta Q = 0.774 > DQ = 0.333$) and acceptable stability conditions were satisfied, confirming the existence of a unique compromise solution. Sensitivity analysis demonstrated that the Development stage maintained 100% ranking stability under all weight scenarios, whereas the Mid and Initial stages exhibited 64% stability and exchanged

1. On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
* Corresponding author: r.mohammadikia@areeo.ac.ir

CC BY

their relative positions only within a narrow range of weight variation. The Late stage consistently remained the least preferred alternative. In addition, Spearman's rank correlation coefficient equaled 1.00 for both annual analyses and the two-year average, indicating complete agreement between rankings obtained using equal and entropy weighting methods.

Conclusion

The results demonstrated that integrating physiological growth characteristics with water productivity indicators through the VIKOR multi-criteria framework provides a reliable approach for identifying critical irrigation stages in sugar beet. Among all growth stages, the Development stage was consistently identified as the most efficient and robust stage for water allocation owing to its higher biomass water productivity, greatest contribution to biomass accumulation, and complete ranking stability under different weighting scenarios. The Mid stage represented the second priority but showed moderate sensitivity to changes in criteria weights, whereas the Initial and Late stages had comparatively lower management priority. The robustness confirmed by sensitivity analysis and Spearman correlation further supports the reliability of the proposed ranking. Therefore, prioritizing irrigation during the Development stage can improve water-use efficiency and support sustainable irrigation management of sugar beet under water-limited conditions.

Keywords: Growth stages; Irrigation management; Multi-criteria decision making; Sensitivity analysis; Sugar beet; Water productivity; VIKOR

References

Bahraseman SE, Firoozzare A, Pourmohammad F, Boccia F, Saghaian S. Determining the best strategies to improve agricultural water productivity in arid and semi-arid regions: An ordinal priority approach. Journal of Arid Environments. 2025; 231: Article 105458. **Doi: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105458.**

Biswas T, Sah RP, Kumar R, Kumar V, Nath CP. Evaluation of management practices in rice–wheat cropping system using multicriteria decision-making methods in conservation agriculture. 2024; Scientific Reports, 14, 8600. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58022-w

Opricovic S, Tzeng GH. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 2004; 156(2): 445–455. **Doi: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1** [Accessed 10 May 2026].

نشریه چغندرقند
Journal Home Page: https://jsb.areeo.ac.ir

اولویت‌بندی مراحل مختلف رشد چغندرقند برای مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره

رضا محمدی کیا[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۲
نوع مقاله: پژوهشی
DOI: 10.22092/jsb.2026.372764.1405
ر. محمدی کیا،۱۴۰۴. اولویت‌بندی مراحل مختلف رشد چغندرقند برای مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره. **چغندرقند ۴۱(۲): ۲۸۵-۳۰۴**

چکیده

کم‌آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید پایدار چغندرقند است و اثر آن در طول دوره رشد گیاه یکنواخت نیست. این پژوهش با هدف اولویت‌بندی مراحل مختلف رشد چغندرقند از منظر بهره‌وری مصرف آب، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور (VIKOR) انجام شد. دو شاخص شامل بهره‌وری آب زیست‌توده و سهم نسبی رشد گیاه در چهار مرحله ابتدایی رشد (از کاشت تا حدود ۱۰٪ پوشش خاک)، مرحله توسعه (از ۱۰٪ تا حدود ۷۰٪ پوشش خاک)، مرحله میانی (از ۷۰٪ تا پوشش کامل خاک)، مرحله پایانی (از پوشش کامل خاک تا برداشت) مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها بر اساس نتایج هر سال و همچنین میانگین دو سال انجام شد. همچنین، تحلیل چندمعیاره به روش ویکور با دو رویکرد وزن‌دهی یکسان به معیارها و وزن‌دهی آنتروپی- شانون انجام گرفت. نتایج نشان داد که در تمام سناریوهای تجزیه داده، مرحله توسعه دارای کمترین مقدار شاخص ویکور (Q=۰) و بالاترین اولویت تصمیم‌گیری بود. پس از آن، مرحله میانی با مقادیر Q حدود ۰/۷۸۱-۰/۲۱۲ در رتبه دوم، مرحله ابتدایی با مقادیر Q حدود ۰/۹۶۹-۰/۸۴۵ در رتبه سوم و مرحله پایانی با مقدار Q=۱ در رتبه چهارم قرار گرفت. بررسی شرایط پذیرش ویکور نشان داد که اگرچه شرط پایداری در تمامی سناریوها برقرار بود، اما شرط برتری مطلق در روش آنتروپی- شانون به‌طور کامل تأمین نشد؛ بنابراین، مجموعه راه‌حل‌های سازشی شامل مراحل توسعه و میانی قابل تعریف است. ضریب همبستگی اسپیرمن و تجزیه حساسیت تورنادو نشان داد که مرحله توسعه در بازه وزنی ۰/۲ تا ۰/۸ کاملاً پایدار بوده و بیش از ۹۵ درصد ثبات رتبه‌ای را حفظ کرده است، در حالی که تنها یک نقطه گذار در حدود وزن ۰/۵۸ مشاهده شد که در آن جایگاه مراحل ابتدایی و میانی تغییر می‌کند. در مجموع، نتایج نشان داد که مرحله توسعه پایدارترین و بهینه‌ترین مرحله برای مدیریت مصرف آب در چغندرقند است. جهت توسعه اطلاعات به دست آمده در این تحقیق ارزیابی در شرایط اقلیمی و مدیریتی متنوع‌تر و مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و مدل‌های هوشمند در مطالعات آینده ضرورت دارد.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی- شانون، بهره‌وری آب، تحلیل چندمعیاره، مدل ویکور

۱. محقق بخش مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
* نویسنده مسئول: r.mohammadikia@areeo.ac.ir

مقدمه

چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی تولیدکننده شکر در جهان، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی، توسعه صنایع غذایی و اقتصاد کشاورزی ایفا می‌کند. پایداری تولید این محصول راهبردی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌شدت تحت تأثیر محدودیت منابع آب و افزایش فراوانی تنش‌های خشکی قرار گرفته است (Pidgeon *et al*. 2001). ایران نیز با قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، با محدودیت جدی منابع آب مواجه بوده و بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، نیازمند توسعه راهکارهای مدیریتی کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات زراعی است (Koocheki *et al*. 2007). در چنین شرایطی، مدیریت صحیح آبیاری و تخصیص بهینه آب به مراحل مختلف رشد گیاه، یکی از مهم‌ترین راهبردهای افزایش بهره‌وری آب و پایداری تولید در کشاورزی محسوب می‌شود. حساسیت چغندرقند به تنش خشکی در طول دوره رشد یکنواخت نبوده و به مرحله رشدی گیاه وابسته است. مطالعات فیزیولوژیک نشان داده‌اند که برخی مراحل رشد نسبت به کمبود آب حساسیت بیشتری دارند و وقوع تنش در این مراحل می‌تواند اثرات جبران‌ناپذیری بر رشد، عملکرد و کیفیت نهایی محصول داشته باشد. به‌عنوان مثال، مرحله توسعه سریع سایبان و مرحله پر شدن ریشه (Bulking) به‌عنوان حساس‌ترین مراحل رشد شناخته می‌شوند، زیرا تنش آبی در این دوره‌ها مستقیماً بر توسعه سطح برگ، ظرفیت فتوسنتزی، توزیع ماده خشک و تجمع ساکارز تأثیر منفی می‌گذارد (Draycott 2006; Hoffmann and Kenter 2018). همچنین گزارش شده است که مراحل استقرار و توسعه اولیه برگ از نظر رشد رویشی و تشکیل سطح برگ نسبت به کم‌آبی حساس‌تر هستند، در حالی‌که برخی مراحل بعدی تحمل نسبی بیشتری نسبت به تنش نشان می‌دهند (Doorenbos and Kassam 1979; Yonts *et al*. 2003; Kenter *et al*. 2006). این تفاوت در پاسخ فیزیولوژیک گیاه به کمبود آب، اهمیت مدیریت مرحله‌محور آبیاری را برای افزایش بهره‌وری آب (Water productivity) و حفظ عملکرد کمی و کیفی محصول آشکار می‌سازد.

از آنجا که واکنش چغندرقند به محدودیت آب در مراحل مختلف رشد متفاوت بوده و هر مرحله می‌تواند اثرات متفاوتی بر عملکرد ریشه، کیفیت تکنولوژیک، بهره‌وری آب و حتی حساسیت گیاه به تنش‌ها و بیماری‌ها داشته باشد، تعیین اولویت مدیریتی این مراحل به یک مسئله پیچیده و چندبعدی تبدیل می‌شود. در چنین شرایطی، تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس یک شاخص منفرد، مانند عملکرد ریشه یا درصد قند، نمی‌تواند تصویری جامع از اهمیت واقعی هر مرحله رشد ارائه دهد؛ بنابراین، ارزیابی هم‌زمان مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی، کیفی، فیزیولوژیک و مدیریتی برای تعیین حساس‌ترین مراحل رشد نسبت به مدیریت مصرف آب ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi-criteria decision making; MCDM) به‌عنوان ابزارهایی کارآمد و معتبر برای تحلیل مسائل پیچیده مدیریتی در کشاورزی و مدیریت منابع آب مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف و گاه متضاد را فراهم ساخته و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا در شرایط محدودیت منابع و حتی در مواجهه با عدم قطعیت و داده‌های ناقص، گزینه‌های مدیریتی مناسب را شناسایی و اولویت‌بندی کنند (Opricovic and Tzeng 2004; Qureshi *et al*. 2018). رویکردهای MCDM در بهینه‌سازی الگوی کشت، مدیریت منابع آب و خاک، ارزیابی سناریوهای آبیاری، تجزیه خطر خشک‌سالی و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های کشاورزی کاربرد گسترده‌ای دارند (Biswas *et al*. 2024; Tuncel and Gunturk 2024). علاوه بر این، استفاده از مدل‌های ترکیبی مبتنی بر روش‌هایی مانند تاپسیس (TOPSIS)، ویکور (VIKOR) و روش‌های وزن‌دهی آنتروپی، توانسته است دقت تصمیم‌گیری و قابلیت رتبه‌بندی گزینه‌های مدیریتی را در سامانه‌های کشاورزی بهبود بخشد (Li *et al*. 2020).

تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره، با فراهم‌کردن یک چارچوب ریاضی نظام‌مند برای ساختاربندی مسئله، تعیین اهمیت نسبی معیارها و ارزیابی گزینه‌ها، امکان بررسی جامع مسائل پیچیده مدیریتی را فراهم می‌سازد (Saaty 1990). در این میان، روش‌هایی نظیر فرآیند تجزیه سلسله‌مراتبی (AHP)، تاپسیس (TOPSIS) و ویکور (VIKOR) از پرکاربردترین ابزارهای تحلیل چندمعیاره در علوم کشاورزی، مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی آبیاری محسوب می‌شوند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که این روش‌ها قادرند با تلفیق هم‌زمان معیارهای متعدد اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی، راهکارهای مدیریتی بهینه‌تری را برای استفاده پایدار از منابع محدود ارائه دهند (Bahraseman *et al*. 2025).

با وجود گسترش کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در علوم کشاورزی، بیشتر مطالعات پیشین در زمینه چغندرقند، اثر مدیریت مصرف آب را به‌صورت مجزا و عمدتاً بر پایه یک یا چند شاخص محدود ارزیابی کرده‌اند. در اغلب این مطالعات، تمرکز اصلی بر بررسی پاسخ عملکرد یا کیفیت محصول در هر مرحله رشد بوده و کمتر پژوهشی به ارزیابی یکپارچه و چندمعیاره حساسیت مراحل مختلف رشد چغندرقند نسبت به مدیریت مرحله‌محور آبیاری پرداخته است؛ بنابراین، همچنان خلأ پژوهشی مشخصی در زمینه استفاده از چارچوب‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رتبه‌بندی جامع مراحل رشد چغندرقند بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های مؤثر بر مدیریت آب وجود دارد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، رتبه‌بندی مراحل چهارگانه رشد چغندرقند شامل مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی از نظر حساسیت به مدیریت مرحله‌محور آبیاری با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای تدوین برنامه‌های آبیاری مرحله‌محور، تخصیص بهینه آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب در شرایط محدودیت منابع فراهم سازد و در نهایت به بهبود پایداری تولید چغندرقند در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

این مطالعه طی دو سال متوالی (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در شهرستان کرج با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی انجام شد. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، گرم و خشک مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است (Jafarpour *et al*. 2023). بر اساس گزارش‌های اقلیمی دوره ۱۴۰۰–۱۳۷۱ در منطقه کرج، میانگین دمای بیشینه حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای کمینه حدود یک درجه سانتی‌گراد بوده است (Anonymous 2021).

ویژگی‌های خاک و آب محل پژوهش

نمونه‌های خاک از عمق‌های ۳۰–۰ و ۶۰–۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل بافت بر اساس استاندارد توصیه‌شده توسط جی و بادر (Gee and Bauder 1986) در آزمایشگاه انجام شد. جرم مخصوص ظاهری با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده و از طریق نسبت جرم خاک خشک به حجم کل 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 (Allen *et al*. 1998; Anonymous 2003). 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، 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.

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
30–6	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 ۷ دسی زیمنس بر متر برای چغندرقند بود و نشان‌دهنده عدم وجود مشکل شوری در آبیاری این محصول بود (Ayers and Westcot 1985). 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 (Anonymous 2003).

جدول ۲ ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 2 Chemical characteristics of irrigation water

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

عملیات زراعی

کاشت گیاه در تمام واحدهای لایسیمتر پس از آماده‌سازی بستر کاشت انجام شد. در مرحله آماده‌سازی، خاک داخل لایسیمتر تا عمق مدنظر یکنواخت‌سازی و همگن شد و سنگ‌ریزه‌ها و بقایای گیاهی درشت از محیط حذف گردید. سپس بستر کشت در محدوده لایسیمتر و همچنین در ناحیه حاشیه‌ای اطراف آن به‌صورت یکسان تسطیح شد تا از ایجاد ناهمگنی رطوبتی و جریان جانبی آب جلوگیری گردد. قبل از کاشت، آبیاری مقدماتی به‌منظور رساندن رطوبت خاک به سطح نزدیک ظرفیت زراعی انجام شد. کشت چغندرقند در دو سال متوالی در یک مزرعه به مساحت ۱۲۰۰ مترمربع انجام شد. تاریخ کاشت در سال اول (۱۳۹۶)، ۲۸ اردیبهشت و در سال دوم (۱۳۹۷)، اول خردادماه بود که به‌صورت دستی انجام شد. فاصله ردیف‌های کشت ۵۰ سانتی‌متر بود و تراکم بوته‌ها ۸۰ هزار بوته در هکتار تنظیم گردید. برای جلوگیری از خسارت ناشی از عدم یکنواختی جوانه‌زنی، در زمان سبزشدن، بوته‌های اضافی حذف و تراکم نهایی در تمام واحدها به‌صورت همسان تنظیم شد. کنترل علف‌های هرز در دوره استقرار و پس از آن به‌طور منظم انجام گرفت. برای این منظور، علف‌های هرز داخل لایسیمتر و نیز در حاشیه اطراف آن به‌صورت دستی حذف شدند تا رقابت غیرقابل کنترل با گیاه اصلی ایجاد نشود. عملیات تنک (اصلاح تراکم) پس از استقرار نهال‌ها انجام شد و در صورت نیاز، گیاهان ضعیف‌تر خارج و بوته‌های سالم در همان الگوی فاصله‌ای جایگزین شدند. برای جلوگیری از اثرات حاشیه‌ای و محدود کردن اثر جریان‌های جانبی، ناحیه اطراف هر لایسیمتر نیز مدیریت زراعی مشابه واحدهای داخل لایسیمتر داشت. به این ترتیب، کاشت در ناحیه حاشیه‌ای با همان رقم و الگوی کشت و

در زمان نزدیک به زمان کاشت داخل لایسیمتر انجام شد. آبیاری، مدیریت تغذیه و کنترل علف‌های هرز برای این بخش نیز مطابق برنامه مدیریتی اعمال گردید تا از تفاوت در رطوبت خاک و تبخیر سطحی بین لایسیمتر و محیط اطراف جلوگیری شود. در طول دوره رشد، هرگونه عملیات تکمیلی شامل تنظیم تراکم، آبیاری و نیز در صورت نیاز مبارزه با آفات و بیماری‌ها به‌صورت هدفمند و با حداقل دخالت در رژیم آبی انجام شد. کوددهی مطابق آزمون خاک بود؛ به‌طوری‌که پیش از کشت، ۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل به‌عنوان کود پایه مصرف گردید و همچنین مقدار ۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار به‌عنوان منبع نیتروژن در برنامه کوددهی لحاظ شد. کود نیتروژنه اوره به شکل مرحله‌ای و در سه نوبت سرک اعمال گردید: نوبت اول شامل ۴۰ کیلوگرم در هکتار در زمان تشکیل چهار تا شش برگی برای تقویت رشد رویشی برگ و افزایش ظرفیت فتوسنتز بود. نوبت دوم با مقدار ۳۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله هشت تا ۱۰ برگی انجام شد تا به توسعه سیستم ریشه و افزایش رشد برگ‌ها کمک شود. نوبت سوم نیز با مقدار ۳۰ کیلوگرم در هکتار، قبل از گسترش کامل ریشه اعمال گردید تا زمینه افزایش عملکرد کمی و بهبود کیفیت محصول فراهم شود. هدف از این زمان‌بندی، افزایش بهره‌وری مصرف نیتروژن و کاهش پیامدهای منفی ناشی از شستشوی نیتروژن یا تلفات آن از طریق تبخیر در طول فصل رشد بود.

تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل چغندرقند (ETc)

برای اندازه‌گیری تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه (ETc) از لایسیمتر زهکش‌دار و مطابق رابطه ۱ استفاده شد.

$$ETc = I + R - D - D_{rz}(\theta_i - \theta_f) \qquad \text{رابطه } ۱$$

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 رابطه ۲ محاسبه شد (Allen et al. 1998):

$$I = (FC - \theta) * Zr \qquad \text{رابطه } ۲$$

که در آن I عمق آب آبیاری (mm)، FC رطوبت خاک در ظرفیت زراعی ($mm\ m^{-1}$)، θ رطوبت خاک قبل از آبیاری ($mm\ m^{-1}$) و Zr عمق مؤثر ریشه (m) است.

آبیاری در لایسیمتر، هم‌زمان با مراحل توسعه ریشه و در عمق متناظر آن انجام شد. آبیاری پس از وقوع تخلیه تا حد مجاز آب قابل استفاده خاک اعمال گردید تا تنش آبی به حداقل برسد و در عین حال، تلفات ناشی از زه‌آب کاهش یابد. حجم آب تحویلی به لایسیمتر با کنتور اندازه‌گیری و ثبت شد. این رویکرد با نتایج مطالعات لایسیمتری مشابه هم‌راستا بود (Allen *et al*. 1998). داده‌های بارندگی از ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت استخراج و در محاسبات بیلان آب وارد شد. از آنجا که عمق لایسیمتر از عمق مؤثر ریشه بیشتر بود، لایه‌های زیر ناحیه ریشه نقش یک مخزن ذخیره اضافی را ایفا کردند؛ بنابراین زه‌آب عمدتاً تنها در نوبت‌های آبیاری سنگین و زمانی که ظرفیت نگهداری خاک فراتر می‌رفت، ایجاد شد. زه‌آب تولیدشده به‌طور منظم جمع‌آوری و در بیلان آب لحاظ گردید. رطوبت خاک در ناحیه ریشه به‌وسیله نوترون‌متر پایش شد و تغییرات ذخیره آب با استفاده از داده‌های حاصل از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه گردید. برای تعیین عمق مؤثر ریشه، با فرض عمق نهایی ریشه برابر ۰/۶۰ متر، در ابتدای فصل رشد عمق مؤثر ریشه ۳۰ درصد عمق نهایی در نظر گرفته شد. در میانه فصل، این مقدار به ۶۰ درصد عمق نهایی افزایش یافت و در مرحله انتهایی رشد، عمق مؤثر ریشه برابر ۱۰۰ درصد عمق نهایی ریشه در نظر گرفته شد. در این چارچوب، فرض بر آن بود که کمبود رطوبت در طول فصل به‌طور کامل با آبیاری جبران شده و نیمرخ ریشه تا ظرفیت زراعی پر می‌شود. به‌منظور کاهش خطای ناشی از در نظر گرفتن روند افزایشی خطی عمق مؤثر ریشه، پس از تعیین عمق نهایی ریشه، تغییرات توسعه ریشه در طول فصل رشد با استفاده از معادله غیرخطی برگ و گریمز

(Borg and Grimes 1986) شبیه‌سازی شد و سپس بر اساس نتایج حاصل، نیاز آبی مجدداً محاسبه گردید.

بهره‌وری آب (WP)

بهره‌وری آب زیست‌توده تولیدی در هر مرحله از رشد بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد:

رابطه ۳

$$WP = \frac{Y}{ET_c}$$

که در آن WP بهره‌وری آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، Y زیست‌توده تولیدی (کیلوگرم در هکتار) و ETc تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه در طول دوره رشد (مترمکعب در هکتار) است (Payero *et al*. 2006; Doorenbos and Kassam 1979). منظور از زیست‌توده، وزن تر اندام هوایی گیاه (برگ و ساقه) بود.

تعیین سهم رشد نسبی گیاه در هر مرحله رشد (Biomass)

مراحل رشد چغندرقند در این مطالعه به چهار دوره شامل ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی تقسیم شد. این تقسیم‌بندی بر اساس ترکیبی از روز پس از کاشت و میزان توسعه پوشش گیاهی انجام گرفت. مرحله ابتدایی از سبز شدن تا استقرار کامل گیاه و پوشش حدود ۱۰ درصد سطح خاک را شامل می‌شود. مرحله توسعه مربوط به افزایش سریع سطح برگ و توسعه کانوپی تا حدود ۷۰ درصد پوشش سطح زمین است. مرحله میانی زمانی است که پوشش گیاهی به حداکثر یا نزدیک به حداکثر رسیده (حدود ۱۰۰ درصد) و رشد رویشی در اوج قرار دارد. مرحله پایانی نیز از تکمیل رشد رویشی تا برداشت محصول ادامه داشته و با کاهش نسبی رشد و انتقال مواد به اندام‌های ذخیره‌ای همراه است (Allen *et al*. 1998). میزان توسعه پوشش گیاهی در طول دوره رشد با استفاده از برنامه Canopeo تعیین شد.

برای اندازه‌گیری وزن تر اندام هوایی، در پایان هر مرحله رشد، برداشت نمونه از واحد سطح حاشیه لایسیمتر انجام شد. پس از جداسازی اندام‌های هوایی، وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری گردید. افزایش وزن تر نسبت به مرحله قبل، به‌عنوان زیست‌توده تولیدی و سهم رشد نسبی هر مرحله در نظر گرفته شد. انتخاب زیست‌توده تر اندام هوایی به این دلیل بود که این شاخص، تغییرات رشد رویشی، توسعه کانوپی و پاسخ فیزیولوژیکی گیاه به مصرف آب را در مراحل مختلف رشد بهتر از عملکرد نهایی نشان می‌دهد (Milford 2006; Kenter *et al*. 2006). همچنین گزارش شده است که توسعه اندام هوایی و ظرفیت فتوسنتزی، نقش کلیدی در شکل‌گیری عملکرد نهایی چغندرقند دارند (Hoffmann and Kenter 2018)؛ بنابراین، استفاده از زیست‌توده اندام هوایی در این مطالعه، با هدف پژوهش و رویکرد مرحله‌محور آن سازگار بوده است.

تجزیه آماری

با توجه به محدود بودن تعداد تکرارهای آزمایش (یک لایسیمتر در سال)، امکان به‌کارگیری مدل‌های آماری پیچیده با توان بالا فراهم نبود. از این‌رو، تجزیه آماری داده‌ها به بررسی‌های توصیفی شامل محاسبه میانگین و انحراف معیار تبخیر–تعرق و زیست‌توده در مراحل مختلف رشد محدود شد. در این تحقیق، به‌منظور رتبه‌بندی مراحل رشد برای مدیریت منابع آب از دیدگاه ایجاد تعادل میان معیارهای عملکردی از روش تحلیل چندمعیاره ویکور (VIKOR) استفاده شد (Opricovic 1998). این روش به‌منظور شناسایی راه‌حل سازشی در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره به کار گرفته می‌شود. در این روش، ابتدا ماتریس تصمیم معیارهای مورد بررسی برای مراحل مختلف رشد گیاه چغندرقند به‌صورت سالانه و میانگین دو سال تشکیل گردید (جدول ۳). مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی به‌عنوان گزینه‌های ماتریس تصمیم در نظر گرفته شدند. سهم رشد نسبی اندام هوایی گیاه (ساقه و برگ) در هر مرحله رشد و کارایی مصرف آب زیست‌توده تولیدی به‌عنوان دو معیار ماتریس تصمیم انتخاب گردید. هر دو معیار به‌عنوان معیار مثبت (بیشتر بهتر–سود) تعریف شدند.

جدول ۳ ماتریس تصمیم‌گیری تجزیه چندمعیاره

Table 3 Multi-criteria decision analysis (MCDA) decision matrix (First year)

سال Year	گزینه‌ها Options	معیارها Criteria: بهره‌وری آب زیست‌توده تولیدی Biomass water productivity ($Kg\ m^{-3}$) (+) (علامت مثبت به معنای بیشتر بهتر) (A positive sign indicates that higher values are preferable)	معیارها Criteria: سهم رشد نسبی گیاه در هر مرحله رشد Relative growth share per growth stage (٪) (+) (علامت مثبت به معنای بیشتر بهتر) (A positive sign indicates that higher values are preferable)
1	مرحله ابتدایی (از کاشت تا حدود ۱۰٪ پوشش خاک) Initial stage (from planting to about 10% soil cover)	4.04	7.22
	مرحله توسعه (از ۱۰٪ تا حدود ۷۰٪ پوشش خاک) Development stage (from 10% to about 70% soil cover)	8.48	45.38
	مرحله میانی (از ۷۰٪ تا پوشش کامل خاک) Mid stage (from 70% to full soil cover)	3.72	41.64
	مرحله پایانی (از پوشش کامل خاک تا برداشت) Late stage (from full soil cover to harvest)	3.98	5.76
2	مرحله ابتدایی (از کاشت تا حدود ۱۰٪ پوشش خاک) Initial stage (from planting to about 10% soil cover)	5.78	7.25
	مرحله توسعه (از ۱۰٪ تا حدود ۷۰٪ پوشش خاک) Development stage (from 10% to about 70% soil cover)	8.84	46.59
	مرحله میانی (از ۷۰٪ تا پوشش کامل خاک) Mid stage (from 70% to full soil cover)	3.95	41.9
	مرحله پایانی (از پوشش کامل خاک تا برداشت) Late stage (from full soil cover to harvest)	3.68	4.26
میانگین Average	مرحله ابتدایی (از کاشت تا حدود ۱۰٪ پوشش خاک) Initial stage (from planting to about 10% soil cover)	5.78	7.25
	مرحله توسعه (از ۱۰٪ تا حدود ۷۰٪ پوشش خاک) Development stage (from 10% to about 70% soil cover)	8.84	46.59
	مرحله میانی (از ۷۰٪ تا پوشش کامل خاک) Mid stage (from 70% to full soil cover)	3.95	41.9
	مرحله پایانی (از پوشش کامل خاک تا برداشت) Late stage (from full soil cover to harvest)	3.68	4.26

برای هر معیار تصمیم‌گیری، مقادیر ایده‌آل و نامطلوب تعیین شدند. با توجه به اینکه هر دو معیار این پژوهش از نوع سودمند (بیشتر–بهتر) بودند، بیشترین مقدار مشاهده‌شده هر معیار به‌عنوان مقدار ایده‌آل و کمترین مقدار آن به‌عنوان مقدار نامطلوب در نظر گرفته شد. سپس فاصله نسبی هر گزینه از این دو مقدار محاسبه و در تعیین شاخص‌های S، R و Q مورد استفاده قرار گرفت. شاخص S به‌عنوان مجموع فاصله‌های وزنی (نشان‌دهنده عملکرد کلی گزینه) و شاخص R به‌عنوان بیشترین فاصله وزنی (نشان‌دهنده بدترین عملکرد گزینه در میان معیارها) محاسبه شد. در نهایت، شاخص نهایی ویکور (Q) با استفاده از رابطه استاندارد این روش و با لحاظ ضریب وزن v (به‌منظور ایجاد تعادل بین استراتژی اکثریت معیارها و معیار با بیشترین نارضایتی) محاسبه

گردید. مقدار Q بین صفر و یک تغییر می‌کند، به‌طوری که مقدار صفر بیانگر گزینه کاملاً مطلوب و مقدار یک نشان‌دهنده کمترین سطح مطلوبیت است. بر اساس مقادیر Q، مراحل رشد گیاه رتبه‌بندی و گزینه بهینه معرفی شد.

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

رابطه۴
$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$$

رابطه۵
$$R_i = MAX_j \left[w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right]$$

که در آن‌ها: fj* بهترین مقدار معیار j، fj− بدترین مقدار معیار j، fij مقدار معیار j برای گزینه i، wj وزن معیار j و n تعداد معیارها است.

رابطه۶
$$Q_i = v\left(\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*}\right) + (1-v)\left(\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}\right)$$

که در آن S^*=Mini S_i، S^-=Maxi S_i، R^*=Mini R_i، R^-=Maxi R_i و v وزن استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است.

منطق وزن‌دهی معیارها در ماتریس تصمیم

وزن‌دهی معیارها به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری (کارایی مصرف آب و سهم رشد نسبی)، با دو رویکرد وزن‌دهی متفاوت انجام شد. در رویکرد اول، بر اساس فرض بی‌طرفانه و فقدان اطلاعات اولیه مبنی بر برتری یک معیار بر دیگری، اهمیت یکسان (وزن ۵۰ درصد) به هر دو معیار اختصاص داده شد. رویکرد دوم، وزن‌دهی عینی مبتنی بر آنتروپی- شانون بود که در آن وزن هر معیار به‌طور خودکار و منحصراً بر اساس پراکندگی و میزان اطلاعات نهفته در داده‌های آن معیار در ماتریس تصمیم، محاسبه شد. در این روش، معیاری که داده‌های آن پراکندگی و تمایز بیشتری را نشان دهد (آنتروپی کمتری داشته باشد)، وزن بالاتری دریافت می‌کند (Shannon 1948). کاربرد هم‌زمان این دو چارچوب وزن‌دهی، امکان بررسی پایداری و حساسیت نتایج نهایی رتبه‌بندی مراحل رشد را در برابر تغییرات بنیادین در مفروضات مربوط به اهمیت معیارها فراهم نمود.

شرایط پذیرش نتایج ویکور

در روش ویکور، پس از محاسبه شاخص‌های (S)، (R) و (Q) و رتبه‌بندی گزینه‌ها، برای اطمینان از قابلیت اتکای راه‌حل پیشنهادی (بهترین گزینه) دو شرط اساسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شرایط به‌منظور بررسی میزان برتری واقعی گزینه اول نسبت به سایر گزینه‌ها و پایداری نتیجه تصمیم‌گیری به کار می‌روند.

شرط اول مزیت قابل قبول (Acceptable advantage):
تفاوت بین مقدار شاخص (Q) مربوط به بهترین گزینه و گزینه دوم باید به اندازه کافی قابل توجه باشد. این شرط به‌صورت رابطه ۷ بیان می‌شود:

رابطه ۷
$$Q\left(A^{(2)}\right) - Q\left(A^{(1)}\right) \geq DQ$$

که در آن $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ به ترتیب بهترین و دومین گزینه بر اساس مقدار (Q) هستند و مقدار (DQ) برابر با:

رابطه ۸
$$DQ = \frac{1}{J-1}$$

شرط دوم پایداری تصمیم (Acceptable stability in decision making):
گزینه برتر باید هم‌زمان در حداقل یکی از رتبه‌بندی‌های مبتنی بر (S) (مجموع فاصله از راه‌حل ایده‌آل) یا (R) (حداکثر پشیمانی فردی) نیز در رتبه اول قرار گیرد. این شرط تضمین می‌کند که انتخاب نهایی تنها وابسته به شاخص ترکیبی (Q) نبوده و از نظر هر دو رویکرد تجمیعی و بدبینانه نیز پایدار باشد.

در صورتی که هر دو شرط فوق برقرار باشند، گزینه رتبه اول به‌عنوان راه‌حل توافقی (Compromise solution) پذیرفته

می‌شود. در غیر این صورت، ممکن است بیش از یک گزینه به‌عنوان راه‌حل‌های قابل قبول معرفی شوند و تصمیم‌گیرنده باید بر اساس شرایط مسئله و تحلیل تکمیلی، گزینه نهایی را انتخاب نماید.

ارزیابی پایداری رتبه‌بندی با ضریب همبستگی اسپیرمن

به‌منظور بررسی میزان پایداری و سازگاری نتایج رتبه‌بندی حاصل از روش ویکور تحت سناریوهای مختلف وزن‌دهی، از ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (Spearman's rank correlation coefficient) استفاده شد. این ضریب میزان همبستگی بین رتبه‌های حاصل از دو روش وزن‌دهی مختلف (وزن برابر و آنتروپی- شانون) را ارزیابی می‌کند و میزان ثبات ساختار تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. ضریب اسپیرمن بر اساس رابطه ۹ محاسبه شد (Siegel and Castellan 1988):

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \qquad \text{رابطه } ۹$$

که در آن ρ ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن، di اختلاف بین رتبه‌های هر گزینه در دو روش وزن‌دهی و n تعداد گزینه‌ها است. مقادیر ρ در بازه ۱- تا ۱+ قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده پایداری بسیار بالای رتبه‌بندی و عدم حساسیت نتایج به تغییر روش وزن‌دهی معیارها است. در این پژوهش، ضریب اسپیرمن به‌صورت جداگانه برای سال اول، سال دوم و همچنین میانگین دو سال محاسبه شد تا میزان پایداری ساختار رتبه‌بندی در شرایط مختلف ارزیابی گردد.

تحلیل حساسیت با روش تورنادو

به‌منظور بررسی حساسیت نتایج رتبه‌بندی نسبت به تغییر وزن معیارها، از تحلیل حساسیت مبتنی بر نمودار Tornado استفاده شد. در این روش، وزن معیارها در یک دامنه مشخص تغییر داده شد و اثر آن بر رتبه نهایی گزینه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، وزن معیار بهره‌وری آب زیست‌توده در بازه ۰/۲ تا ۰/۸ تغییر داده شد و وزن معیار دوم به‌صورت مکمل تنظیم گردید؛ به‌طوری‌که مجموع وزن‌ها همواره برابر با یک باقی بماند. در هر سناریوی وزنی، مقادیر شاخص‌های S، R و Q در روش ویکور مجدداً محاسبه و رتبه‌بندی گزینه‌ها استخراج شد. سپس تغییرات رتبه‌ها در برابر تغییر وزن معیارها تحلیل گردید.

تمام محاسبات و نمودارهای مربوط به تجزیه حساسیت با استفاده از نرم‌افزار Python و کتابخانه‌های Pandas، Numpy، Matplotlib و Seaborn انجام شد.

نتایج و بحث

دوره رشد، تبخیر -تعرق و عملکرد زیست‌توده اندام هوایی گیاه

میانگین دوره رشد چغندرقند در کرج طی سال‌های اجرای پژوهش ۱۸۴ روز و طول مرحله ابتدایی رشد ۲۵ روز، مرحله توسعه ۴۳ روز، مرحله میانی ۸۱ روز و مرحله پایانی ۳۵ روز تعیین شد. میانگین تبخیر—تعرق برای کل دوره رشد ۹۱۳/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مقدار آن از ۷۲/۲۵ میلی‌متر در مرحله ابتدایی رشد به ۲۵۵/۵ میلی‌متر در مرحله توسعه و به ۵۲۳/۶ میلی‌متر در مرحله میانی رسید و سپس در مرحله پایانی به ۶۲/۱۵ میلی‌متر کاهش یافت. بر اساس میانگین اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای دو سال، زیست‌توده تولیدی تر اندام هوایی چغندرقند از ۲۰۴۷/۷۲ کیلوگرم در هکتار در مرحله اولیه رشد به ۲۸۲۹۵ کیلوگرم در مرحله پایانی افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد پیوسته و تجمع ماده تر به‌ویژه در مراحل توسعه و میانی بود. نتایج سال‌های آزمایشی نشان داد که تجمع زیست‌توده چغندرقند در طول دوره رشد دارای روند سیگموئیدی بود؛ به‌طوری که پس از رشد کند اولیه، سرعت افزایش زیست‌توده در مرحله توسعه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در مراحل میانی و پایانی به حالت تقریباً پایدار رسید. این الگو نشان می‌دهد که دوره رشد توسعه و میانی، مهم‌ترین مراحل برای تجمع ماده خشک و بهبود عملکرد نهایی محصول هستند. وزن کل زیست‌توده تولیدی تر در سال اول ۲۴/۴۸ تن در هکتار و عملکرد تر ریشه چغندرقند ۴۴/۵ تن در هکتار بود. در سال دوم مقدار زیست‌توده تولیدی تر به ۳۲/۱۱ تن در هکتار و عملکرد تر ریشه به ۵۱/۸ تن در هکتار رسید.

مقادیر گزارش‌شده برای تبخیر–تعرق کل چغندرقند در مناطق نیمه‌خشک، عموماً در بازه ۸۵۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر برای یک دوره رشد ۱۶۰ تا ۲۲۰ روزه قرار دارد (Allen *et al*. 1998; Kiziloglu *et al*. 2006; Ebrahimipak *et al*. 2012). عملکرد ریشه چغندرقند در شرایط نیمه‌خشک، بسته به ژنوتیپ، شرایط آبیاری و تاریخ کاشت، می‌تواند تغییر قابل‌توجهی داشته باشد (Mohammadian *et al*. 2005; Mohammadian *et al*. 2008; Topak *et al*. 2010).

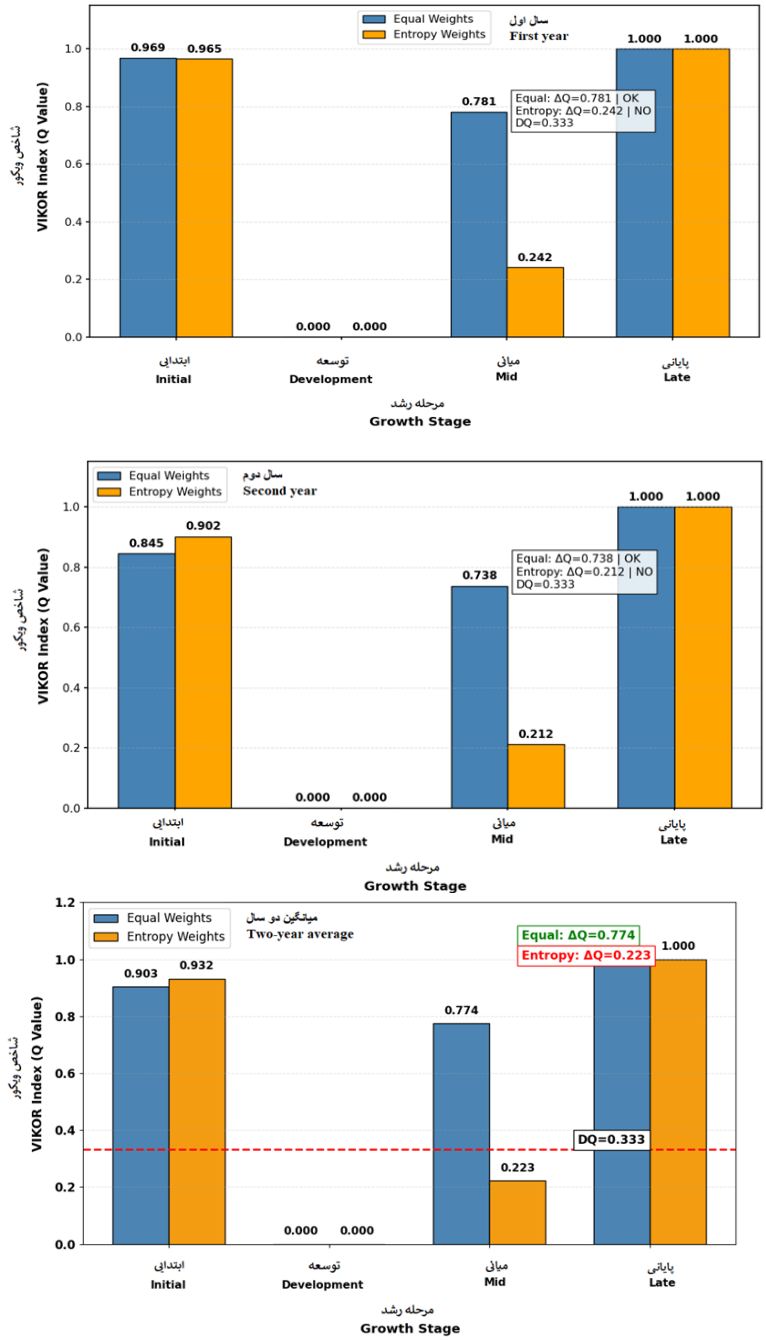
که در مقایسه با عملکردهای گزارش‌شده در سیستم‌های بهینه آبیاری و با ارقام پر محصول، کمتر ارزیابی می‌شود (Hoffmann 2010). الگوی تجمع زیست‌توده در چغندرقند عموماً از یک روند سیگموئیدی (S شکل) تبعیت می‌کند که در آن رشد در مراحل اولیه کند، در مراحل میانی سریع و در انتهای دوره به تثبیت می‌رسد (Milford 2006). این الگوی رشد بر اهمیت مدیریت دقیق نهاده‌ها به‌ویژه در مراحل توسعه و پر شدن ریشه، برای حصول عملکرد بهینه در شرایط محدودکننده منابع تأکید دارد.

رتبه‌بندی مراحل رشد

در سال اول و تحت هر دو سناریوی وزن‌دهی برابر و آنتروپی–شانون (شکل ۱)، مرحله توسعه کمترین مقدار شاخص ویکور (Q= 0) را به خود اختصاص داد و در نتیجه نزدیک‌ترین گزینه به راه‌حل ایده‌آل شناخته شد. این مرحله همچنین کمترین مقادیر S و R را داشت که نشان‌دهنده بهترین عملکرد کلی و کمترین بیشینه پشیمانی در میان مراحل رشد است. در سناریو با وزن برابر، مرحله میانی با مقدار Q برابر ۰/۷۸۱ در رتبه دوم قرار گرفت و بیانگر یک گزینه متعادل و سازشی در فضای تصمیم‌گیری بود. مراحل ابتدایی و پایانی به ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفتند و مرحله پایانی با بیشترین مقادیر Q، S و R ضعیف‌ترین وضعیت را نشان داد.

در وزن‌دهی با روش آنتروپی– شانون، نتایج نشان داد که معیار سهم رشد نسبی (E=۰/۷۷۷۱ و W=۰/۸۱۴۷) دارای درجه تمایز بسیار بیشتری نسبت به معیار بهره‌وری آب (E=۰/۹۴۹۳ و W=۰/۱۸۵۳) است؛ به عبارت دیگر، داده‌های سهم رشد نسبی بین مراحل رشد پراکندگی بیشتری دارند و اطلاعات مفیدتری برای تصمیم‌گیری ارائه می‌دهند. در روش آنتروپی، مرحله میانی (Q=۰/۲۴۲) با کاهش قابل ملاحظه مقدار (Q) نسبت به سناریو وزن یکسان، موقعیت خود را تقویت کرد، زیرا وزن بالای سهم رشد نسبی (۸۱/۴۷ درصد) عملکرد خوب این مرحله در این معیار را پررنگ کرد. مراحل ابتدایی (Q=۰/۹۶۵) و پایانی (Q=۱) بدون تغییر در رتبه‌های سوم و چهارم باقی ماندند، اما مقادیر (S) و (R) آن‌ها تحت تأثیر وزن معیار سهم رشد نسبی افزایش یافت.

در سال دوم، نتایج حاصل از هر دو سناریوی وزن‌دهی (شکل ۱)، نشان داد که مرحله توسعه با کسب کمترین مقدار شاخص ویکور (Q=۰) بهترین مرحله رشد برای مدیریت مصرف آب است. این مرحله با داشتن بالاترین مقدار در هر دو معیار (بهره‌وری آب ۸/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب و سهم رشد نسبی ۴۶/۵۹ درصد)، برتری آشکاری نسبت به سایر مراحل نشان داد. پس از آن، مرحله میانی با مقادیر Q برابر با ۰/۷۳۸ (در وزن‌های برابر) و ۰/۲۱۲ (در وزن آنتروپی) در رتبه دوم قرار گرفت. مرحله ابتدایی و مرحله پایانی به ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم جای گرفتند که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر آن‌ها در هر دو معیار است. علی‌رغم تفاوت در وزن‌های به‌دست‌آمده از روش آنتروپی–شانون (وزن معیار سهم رشد نسبی ۰/۸۳۷ و وزن معیار بهره‌وری آب ۰/۱۶۳)، ترتیب نهایی رتبه‌بندی در هر دو سناریو یکسان باقی ماند.



شکل ۱ رتبه‌بندی مراحل رشد با وزن دهی یکسان و آنتروپی- شانون

Figure 1 Ranking of growth stages using equal weighting and Shannon entropy weightin

نتایج رتبه‌بندی میانگین دو سال (شکل ۱) نیز همین روند را تأیید کرد. نتایج تجزیه تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر روش ویکور، یک الگوی رتبه‌بندی پایدار و منسجم را در هر دو روش وزن‌دهی (وزن‌های برابر و وزن‌های مبتنی بر آنتروپی) نشان داد. در تمامی سناریوها، مرحله توسعه به‌عنوان مطلوب‌ترین گزینه شناسایی شد و مقدار Q آن برابر با صفر به دست آمد که نشان‌دهنده برتری کامل این گزینه از نظر مطلوبیت گروهی (S) و پشیمانی فردی (R) است. این موضوع تأیید می‌کند که مرحله توسعه، بدون توجه به روش وزن‌دهی، به‌عنوان راه‌حل مصالحه‌ای بهینه عمل می‌کند.

پایداری مرحله توسعه در هر دو روش وزن‌دهی بیانگر عملکرد قوی آن در ایجاد تعادل بین دو معیار مورد بررسی، یعنی بهره‌وری آب زیست‌توده و سهم رشد نسبی است. این نتیجه نشان می‌دهد که این مرحله نقش کلیدی در بهینه‌سازی کارایی مصرف آب و

پویایی رشد گیاه دارد و دوره‌ای حیاتی برای مداخلات مدیریتی در شرایط متغیر کشاورزی محسوب می‌شود. در مقابل، مرحله میانی حساسیت قابل توجهی نسبت به ساختار وزن‌دهی نشان داد. در حالت وزن‌های برابر، مقدار Q آن (۰/۷۷۴) نشان‌دهنده رتبه متوسط بود، در حالی که در حالت وزن آنتروپی این مقدار به‌طور قابل توجهی بهبود یافت (Q=۰/۲۲۳) و به عملکرد مرحله توسعه نزدیک شد. این تغییر ناشی از وزن بالاتر اختصاص‌یافته به معیار سهم رشد نسبی در روش آنتروپی است که اهمیت این مرحله را به دلیل سهم بالاتر آن در تجمع زیست‌توده و فرآیندهای رشد فیزیولوژیک افزایش می‌دهد. این حساسیت نشان می‌دهد که مرحله میانی می‌تواند به‌عنوان یک گزینه وابسته به شرایط تصمیم‌گیری مطرح باشد، به‌ویژه در چارچوب‌هایی که رشد گیاه نسبت به بهره‌وری آب اولویت بیشتری دارد. مراحل ابتدایی و پایانی در هر دو روش وزن‌دهی عملکرد ضعیفی از خود نشان دادند، به‌طوری که مقادیر Q آن‌ها به ترتیب در حدود ۰/۹۰۳ تا ۱ قرار داشت. این نتایج بیانگر کارایی محدود این مراحل از نظر معیارهای مورد بررسی بوده و نشان‌دهنده بهره‌وری پایین آب و سهم کمتر در رشد کلی گیاه است. پایداری این رتبه‌ها در هر دو روش وزن‌دهی، ضعف عملکرد این مراحل را تأیید می‌کند.

اگرچه مرحله ابتدایی در رتبه‌بندی نهایی حساسیت، پس از مراحل توسعه و میانی قرار گرفت، اما این موضوع به معنی عدم نیاز گیاه به آب در این مرحله نیست. تأمین رطوبت کافی در دوره جوانه‌زنی و استقرار اولیه برای سبز شدن یکنواخت و تشکیل تراکم مناسب بوته کاملاً ضروری است. نتایج این پژوهش صرفاً نشان می‌دهد که پس از استقرار اولیه، حساسیت مرحله ابتدایی از نظر کارایی مصرف آب و سهم رشد نسبی، کمتر از مرحله توسعه است و در شرایط محدودیت آب، اعمال کم‌آبیاری کنترل‌شده در این مرحله نسبت به مرحله توسعه، ریسک کمتری خواهد داشت.

از منظر روش‌شناختی، مقایسه دو روش وزن‌دهی نشان داد که اگرچه ساختار رتبه‌بندی کلی نسبتاً پایدار است، اما وزن‌دهی آنتروپی قدرت تفکیک مدل را افزایش داده و اهمیت معیار اطلاعاتی‌تر را تقویت کرده است. با این حال، شرط مزیت قابل قبول در روش ویکور در حالت آنتروپی به‌طور کامل برقرار نشد که نشان می‌دهد اختلاف بین بهترین و گزینه دوم به اندازه کافی برای ایجاد یک راه‌حل مصالحه‌ای یکتا نیست. با این وجود، شرط پایداری رتبه‌بندی برقرار بوده و قابلیت اعتماد ساختار رتبه‌بندی را تأیید می‌کند. به‌عبارت دیگر، اگرچه مرحله توسعه در روش وزن‌دهی آنتروپی کمترین مقدار Q را داشت، اما در همه موارد فاصله آن با مرحله میانی به‌اندازه‌ای نبود که بتوان آن را به‌عنوان یک راه‌حل سازشی یکتا معرفی کرد؛ بنابراین، در روش وزن‌دهی آنتروپی، مراحل توسعه و میانی به‌صورت مشترک مجموعه راه‌حل‌های توافقی (Compromise solution set) را تشکیل دادند. این نتیجه بیان می‌کند که مرحله توسعه دارای برتری نسبی بوده و مرحله میانی نیز از نظر تعادل بین معیارها جایگاه رقابتی نزدیکی با آن داشته است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که مرحله توسعه پایدارترین و قابل‌اعتمادترین دوره برای بهینه‌سازی هم‌زمان بهره‌وری آب و کارایی رشد در سیستم مورد مطالعه است. مرحله میانی، اگرچه همواره بهینه نیست، اما می‌تواند در شرایطی که معیارهای مرتبط با رشد اولویت دارند، به‌عنوان گزینه جایگزین مطرح شود. این یافته‌ها می‌توانند برای مدیریت دقیق کشاورزی و راهبردهای تخصیص منابع در شرایط وزن‌دهی متفاوت، بینش‌های ارزشمندی فراهم کنند.

از منظر کاربردی، این یافته‌ها بستری محکم برای طراحی استراتژی‌های مدیریتی بلندمدت و یکنواخت فراهم می‌آورد. تمرکز مدیریت مصرف آب در مراحل توسعه و میانی که در این مطالعه به‌عنوان مؤثرترین مراحل شناسایی شد، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد بهینه در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت مزرعه اتخاذ شود. در نهایت، این هماهنگی قوی بین نتایج، عدم قطعیت تصمیم‌گیری را به‌طور چشمگیری کاهش داده و امکان برنامه‌ریزی مطمئن‌تر با ریسک پایین‌تر را در سیستم‌های کشاورزی مشابه فراهم می‌سازد.

البته باید توجه داشت که حساسیت نسبی مراحل رشد چغندرقند نسبت به مدیریت مصرف آب تنها به ویژگی‌های فنولوژیکی محدود نمی‌شود، بلکه تحت تأثیر شرایط هم‌زمان اقلیمی از جمله

دما و تبخیر–تعرق نیز قرار دارد. در این مطالعه، مراحل توسعه و میانی هم‌زمان با دوره اوج دمای محیطی و بیشترین میزان تبخیر–تعرق رخداده است که می‌تواند موجب افزایش تقاضای آبی گیاه و تشدید اثر تنش آبی شود؛ بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده در حساسیت مراحل رشد علاوه بر ویژگی‌های ذاتی مراحل فنولوژیک، ناشی از برهم‌کنش این مراحل با شرایط محیطی غالب هر دوره نیز می‌باشد.

برخی مطالعات پیشین، مرحله توسعه برگ را به‌عنوان مرحله بحرانی چغندرقند در مواجهه با تنش آبی معرفی کرده‌اند. برای مثال، پژوهش‌های یونتس و همکاران (Yonts *et al*. 2003) و کینتر و همکاران (Kenter *et al*. 2006) نشان دادند که تنش آبی در دوره توسعه برگ (معادل مرحله ۸–۴ برگی) بیشترین کاهش را در عملکرد ریشه و کیفیت نهایی ایجاد می‌کند. این نتیجه همسو با یافته‌های مطالعه حاضر است که مرحله توسعه را به‌عنوان یکی از مراحل رشد با بیشترین بهره‌وری آب و سهم رشد نسبی شناسایی کرده است.

اکثر منابع، مانند گزارش‌های فائو و مراجع مدیریت آبیاری چغندرقند، مرحله پایانی را دوره‌ای معرفی می‌کنند که گیاه نسبت به کم‌آبی تحمل بیشتری دارد و کاهش آب در این مرحله تأثیر کم‌تری بر عملکرد کلی دارد. این دیدگاه با نتیجه مطالعه حاضر که مرحله پایانی را دارای کمترین بهره‌وری آب و کمترین سهم رشد نسبی ارزیابی کرد، همخوانی کامل دارد. این تطابق، اعتبار نتیجه‌گیری مطالعه را تقویت می‌کند.

برخی مطالعات مانند مطالعه ماک و همکاران (Mäck *et al*. 2017) بر حساسیت مرحله ابتدایی به خشکی تأکید دارند، زیرا عدم آبیاری مناسب در این مرحله می‌تواند به کاهش تراکم نهایی گیاه منجر شود. مطالعه حاضر این مرحله را در رتبه سوم، پس از توسعه و میانی قرار داد که نشان می‌دهد از نظر بهره‌وری آب و سهم رشد نسبی، این مرحله در موقعیت متوسطی قرار دارد. این تفاوت در رتبه‌بندی ممکن است ناشی از تفاوت در معیارهای ارزیابی باشد. مطالعات پیشین بر بقاء گیاه و تراکم تمرکز دارند، در حالی مطالعه حاضر معیارهای بهره‌وری فیزیولوژیکی و رشد نسبی را اندازه‌گیری کرده است؛ بنابراین، نتیجه حاضر نه‌تنها با مطالعات پیشین تضاد ندارد، بلکه مکمل آن است. مرحله ابتدایی از نظر بقاء حساس است، اما از نظر بازده رشد فیزیولوژیکی در وضعیت متوسط قرار دارد.

بسیاری از مطالعات پیشین حساسیت مراحل رشد را بر اساس عملکرد نهایی (ریشه و شکر) یا پاسخ‌های مورفولوژیکی ارزیابی کرده‌اند. مطالعه حاضر با معرفی و ترکیب دو معیار بهره‌وری آب (مربوط به مدیریت منابع) و سهم رشد نسبی (مربوط به توزیع رشد) در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره ویکور، یک شاخص ترکیبی و کمی از حساسیت و بهره‌وری مرحله رشد ارائه داده است. این نگاه ترکیبی، امکان اولویت‌بندی مراحل را نه فقط بر اساس یک جنبه (مثلاً عملکرد)، بلکه بر اساس تعادل بین بازده آب و رشد فراهم می‌کند. این امر گامی تکمیلی به مطالعات گذشته است و ابزار دقیق‌تری برای برنامه‌ریزی آبیاری مرحله–محور ارائه می‌دهد.

نتایج این مطالعه در مقایسه با پژوهش‌های معتبر پیشین درباره مراحل مهم رشد چغندرقند برای مدیریت مصرف آب، نشان‌دهنده هماهنگی اساسی در شناسایی مراحل توسعه و میانی به‌عنوان دوره بحرانی است. این همخوانی، اعتبار یافته‌های فیزیولوژیکی حاضر را تقویت می‌کند. نقطه تمایز و ارزش‌افزوده این پژوهش، در ارائه یک چارچوب کمی ترکیبی است که اهمیت مراحل رشد را نه بر اساس یک شاخص منفرد، بلکه بر مبنای تعادل بین بهره‌وری آب و توزیع رشد نسبی ارزیابی می‌کند. این نگاه جامع، دیدگاه تک‌معیاره مطالعات گذشته را تکمیل کرده و ابزار دقیق‌تری برای اولویت‌بندی مدیریت آب در مراحل مختلف رشد فراهم می‌آورد.

ضریب اسپیرمن نتایج رتبه‌بندی

نتایج ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین روش‌های وزن‌دهی برابر و آنتروپی نشان داد که رتبه‌بندی مراحل رشد در هر دو سال و همچنین در تجزیه میانگین دو سال کاملاً یکسان بوده است (ρ =۱). این موضوع بیانگر پایداری بسیار بالای ساختار تصمیم‌گیری و عدم حساسیت رتبه‌بندی نهایی نسبت به تغییر روش وزن‌دهی معیارها است. در نتیجه، می‌توان نتیجه

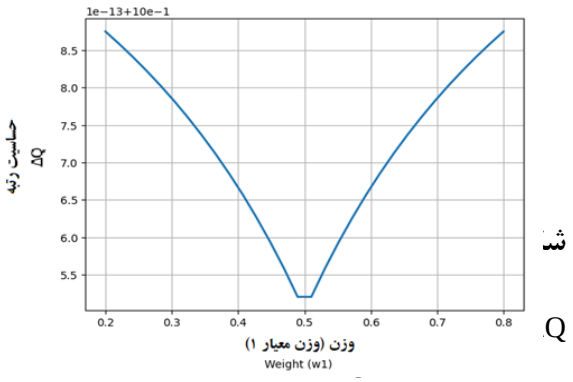
گرفت که مدل ویکور در این مطالعه از قابلیت اطمینان و استحکام بالایی برخوردار بوده است.

حساسیت نتایج رتبه‌بندی نسبت به تغییر وزن معیارها

شکل ۲ تجزیه حساسیت تورنادو (ΔQ)، نشان می‌دهد که ساختار تصمیم‌گیری مدل ویکور در برابر تغییر وزن معیارها از پایداری نسبتاً بالایی برخوردار است، زیرا دامنه تغییرات شاخص ΔQ در کل بازه تغییر وزن‌ها محدود باقی مانده و تنها یک ناحیه حداقل در حوالی W1=۰/۵ مشاهده می‌شود. شکل منحنی به‌صورت U شکل متقارن است که بیانگر آن است که سیستم تصمیم‌گیری در حالت تعادل وزن‌ها (وزن‌های تقریباً برابر) بیشترین پایداری را دارد، در حالی‌که با افزایش غلبه یکی از معیارها، حساسیت مدل افزایش می‌یابد.

کمینه منحنی در حوالی W1=۰/۵ نشان می‌دهد که در شرایط وزن‌دهی متعادل، اختلاف بین گزینه‌ها حداقل شده و فضای تصمیم‌گیری به حالت سازشی نزدیک می‌شود. این رفتار بیانگر آن است که در این نقطه، هیچ‌یک از معیارها بر دیگری سلطه کامل ندارد و رتبه‌بندی گزینه‌ها عمدتاً بر پایه تعادل میان معیارها شکل می‌گیرد. در مقابل، با دور شدن وزن‌ها از حالت تعادل و افزایش سهم یکی از معیارها، مقدار ΔQ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تقویت فاصله عملکردی بین گزینه‌ها و حساس‌تر شدن نتایج نسبت به تغییرات وزن است. با وجود این افزایش نسبی ΔQ در دو انتهای بازه وزن، شکل منحنی همچنان ملایم و پیوسته باقی مانده و هیچ جهش ناگهانی یا ناپایداری شدید مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که مدل ویکور در برابر تغییرات تدریجی وزن معیارها رفتار پایداری داشته و ساختار رتبه‌بندی دچار آشفتگی شدید نشده است. در نتیجه، تحلیل تورنادو تأیید می‌کند که چارچوب تصمیم‌گیری مورد استفاده از پایداری مناسبی برخوردار بوده و نتایج رتبه‌بندی مراحل رشد تا حد زیادی مستقل از تغییرات معقول در اهمیت معیارها باقی می‌مانند.

از دیدگاه تصمیم‌گیری، این الگو بیانگر آن است که رقابت اصلی میان گزینه‌های برتر در ناحیه میانی وزن‌ها رخ می‌دهد؛ جایی که تفاوت عملکرد گزینه‌ها کاهش یافته و احتمال تشکیل مجموعه راه‌حل‌های سازشی افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، در وزن‌های افراطی، یک معیار بر فرآیند تصمیم‌گیری غلبه پیدا کرده و تمایز بین گزینه‌ها بیشتر می‌شود؛ بنابراین، شکل تورنادو نه‌تنها پایداری مدل را تأیید می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که نتایج ویکور در شرایط وزن‌دهی متعادل، تفسیرپذیری و قابلیت اعتماد بیشتری دارند.

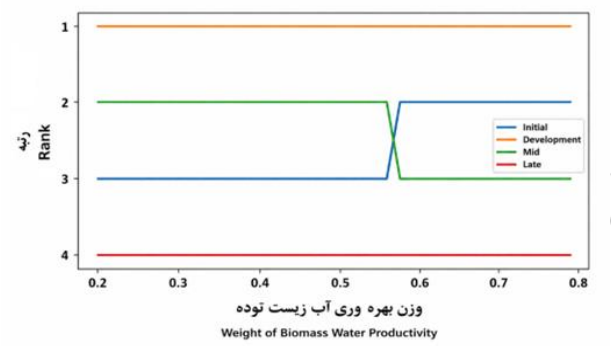


شکل ۳ پایداری رتبه‌ها تحت تغییر وزن معیارها را نشان می‌دهد

و از دیدگاه تصمیم‌گیری چندمعیاره یکی از مهم‌ترین نمودارهای اعتبارسنجی نتایج ویکور محسوب می‌شود. نتایج حاصل از به‌کارگیری روش ویکور در اولویت‌بندی مراحل مختلف رشد چغندرقند نشان داد که اگرچه در هر دو تحلیل سالانه و همچنین تحلیل مبتنی بر میانگین دو سال، مرحله توسعه دارای کمترین مقدار شاخص Q و در نتیجه بالاترین اولویت تصمیم‌گیری است، اما شرایط پذیرش ویکور به‌طور کامل برقرار نیست. به‌طور مشخص، شرط اول (مزیت قابل قبول) در هیچ‌یک از سناریوها به‌طور کامل ارضا نشده است؛ به این معنا که اختلاف بین گزینه اول و دوم از حد آستانه بحرانی DQ کمتر بوده و برتری قاطع و مطلق بین گزینه‌ها قابل اثبات نیست. در مقابل، شرط دوم (پایداری تصمیم) در تمامی حالت‌ها برقرار بوده است که نشان‌دهنده ثبات ساختاری نتایج و سازگاری رتبه اول با

معیارهای S و R است. در چنین شرایطی، مطابق منطق روش ویکور، امکان معرفی یک گزینه منفرد به‌عنوان راه‌حل قطعی وجود ندارد و به‌جای آن، مجموعه‌ای از راه‌حل‌های سازشی موردپذیرش قرار می‌گیرد.

معیارها رتبه اول را حفظ کرده و از نظر شاخص‌های S و R نیز عملکرد برتری دارد. این ویژگی نشان‌دهنده پایداری تصمیم‌گیری و مقاومت بالای این مرحله در برابر تغییر اهمیت نسبی معیارهای ورودی است.



بر اساس نتایج این پژوهش، مرحله توسعه به‌عنوان گزینه غالب و پایدارترین راه‌حل شناسایی شد که در اغلب فضای تغییر وزن در مقابل، مرحله میانی به‌عنوان دومین گزینه مهم در مجموعه سازشی قابل تعریف است. این مرحله اگرچه در شرایط پایه و در برخی بازه‌های وزنی در رتبه دوم قرار دارد، اما در تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که به تغییر وزن معیارها واکنش‌پذیر بوده و در بخش‌هایی از فضای تصمیم‌گیری می‌تواند به‌عنوان یک گزینه رقابتی ظاهر شود. به همین دلیل، این مرحله به‌عنوان گزینه سازشی مکمل در کنار مرحله توسعه قابل در نظر گرفتن است.

مرحله ابتدایی علی‌رغم قرار گرفتن در موقعیت میانی از نظر عملکرد، به دلیل عدم پایداری کافی در رتبه‌های بالای تصمیم‌گیری و فاصله نسبی از مقدار بهینه Q، در مجموعه نهایی راه‌حل‌های سازشی قرار نمی‌گیرد و بیشتر به‌عنوان یک گزینه انتقالی بین مراحل میانی و پایانی عمل می‌کند. همچنین مرحله پایانی در تمامی سناریوها دارای بدترین عملکرد بوده و از نظر تمامی شاخص‌ها در پایین‌ترین اولویت قرار دارد.

در مجموع، تحلیل حساسیت مبتنی بر تغییر وزن معیارها نشان داد که ساختار تصمیم‌گیری از پایداری قابل قبولی برخوردار است و تنها یک نقطه گذار محدود در فضای وزن‌دهی وجود دارد که در آن نقش نسبی مراحل توسعه و میانی دچار تغییر می‌شود. با این حال، مرحله توسعه در تمام شرایط به‌عنوان گزینه غالب و پایدار باقی مانده و می‌تواند به‌عنوان گزینه مدیریتی اصلی در بهینه‌سازی مصرف آب در مراحل رشد چغندرقند پیشنهاد شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مراحل رشد چغندرقند از نظر بهره‌وری آب و سهم رشد نسبی دارای رفتار کاملاً متفاوتی هستند و نمی‌توان آن‌ها را با یک معیار منفرد ارزیابی کرد. استفاده از مدل ویکور در چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان ترکیب هم‌زمان شاخص‌های فیزیولوژیکی و مدیریتی را فراهم کرد و یک اولویت‌بندی کمی و قابل اعتماد ارائه داد. نتایج حاصل از تحلیل سالانه و میانگین دو سال نشان داد که مرحله توسعه در تمامی شرایط به‌عنوان پایدارترین و برترین گزینه شناخته می‌شود، در حالی که مرحله میانی به‌عنوان گزینه دوم و حساس به تغییر وزن معیارها عمل می‌کند. مرحله ابتدایی نقش انتقالی داشته و تنها در برخی سناریوها بهبود نسبی نشان می‌دهد، اما در مجموعه راه‌حل‌های سازشی اصلی قرار نمی‌گیرد. مرحله پایانی نیز در تمام شرایط کمترین اولویت را داشته و از نظر مدیریتی کم‌اهمیت‌ترین مرحله محسوب می‌شود. بررسی شرایط پذیرش مدل ویکور نشان داد که اگرچه اختلاف بین گزینه اول و دوم برای ایجاد برتری قطعی کافی نیست، اما پایداری رتبه‌بندی در شاخص‌های S و R تأییدکننده اعتبار نتایج است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت مبتنی بر ضریب اسپیرمن و تغییر وزن معیارها نشان داد که ساختار تصمیم‌گیری از پایداری بالایی برخوردار بوده و تنها یک نقطه گذار محدود در نزدیکی وزن‌های متعادل مشاهده می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک ساختار

تصمیم‌گیری مقاوم است که در آن مرحله توسعه به‌عنوان گزینه غالب در اکثر سناریوها باقی می‌ماند. در نتیجه، مدیریت آبیاری در چغندرقند باید به‌طور ویژه بر مرحله توسعه تمرکز داشته باشد، زیرا بیشترین بازده بهره‌وری آب در این دوره حاصل می‌شود و بیشترین اثر را در بهینه‌سازی مصرف منابع آبی دارد. با وجود نتایج قابل‌قبول، این پژوهش دارای محدودیت‌هایی از جمله استفاده از تنها دو معیار تصمیم‌گیری، اجرای آزمایش تحت یک برنامه آبیاری مشخص و محدود بودن شرایط اقلیمی و زمانی مطالعه بود. همچنین، برخی شاخص‌های فیزیولوژیک، اقتصادی و کیفی محصول در مدل وارد نشدند؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، معیارهای تکمیلی رشد و بهره‌وری، شرایط مختلف تنش آبی و اقلیم‌های متنوع بررسی شوند. همچنین، مقایسه مدل ویکور با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و استفاده از مدل‌های رشد گیاه، سنجش‌ازدور و روش‌های هوش مصنوعی می‌تواند به توسعه سامانه‌های دقیق‌تر مدیریت آب در محصولات زراعی کمک کند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

این مقاله که مستخرج از پروژه تحقیقاتی است با حمایت‌های مالی مؤسسه تحقیقات خاک و آب و همکاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندرقند اجرا گردیده است. بدین‌وسیله از حمایت‌ها و زحمات همکاران آن مؤسسه محترم تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

References

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rom,1998; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

Anonymous. Irrigation water quality guidelines. FAO . Rome, Italy, 2003; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Available at: https://www.fao.org/3/y3674e/y3674e00.htm [Accessed 10 May 2026].

Anonymous. Long-term climatic data for Karaj region (1992–2021). Iran Meteorological Organization. Tehran, Iran. 2021 (In Persian).

Ayers RS, Westcot DW. Water quality for agriculture. FAO Rome, Italy, 1985; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Available at: https://www.fao.org/3/t0234e/T0234E00.htm [Accessed 10 May 2026].

Bahraseman SE, Firoozzare A, Pourmohammad F, Boccia F, Saghaian S. Determining the best strategies to improve agricultural water productivity in arid and semi-arid regions: An ordinal priority approach. Journal of Arid Environments. 2025; 231: Article 105458. **Doi: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105458.**

Biswas T, Sah RP, Kumar R, Kumar V, Nath CP. Evaluation of management practices in rice–wheat cropping system using multicriteria decision-making methods in conservation agriculture. 2024; Scientific Reports, 14, 8600. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-024-58022-w

Borg H, Grimes DW. Depth development of roots with time: An empirical description. Transactions of the ASAE. 1986; 29(1):194–197. **Doi: https://doi.org/10.13031/2013.30125** [Accessed 10 May 2026].

Doorenbos J, Kassam AH. Yield response to water. FAO Rome, Italy, 1979; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Draycott AP. Sugar Beet, Oxford , 2006; pp.474 Blackwell Publishing.

Ebrahimipak NA, Tafteh A, Ramezani Etedali H. Evaluation of AquaCrop model for wheat, corn and sugar beet under different irrigation managements in Karaj area. Journal of Water and Soil, 2012; 26(4): 777–789. [In Persian]

Gee GW, Bauder JW. Particle-size analysis. InKlute A. (Ed). Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison, WI: Soil Science Society of America. 1986; 383–411.

Hoffmann CM, Kenter C. Yield potential of sugar beet—Have we hit the ceiling? Frontiers in Plant Science. 2018; 9, Article 289. **Doi: https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00289**

Hoffmann CM. Root quality of sugarbeet. Sugar Tech. 2010; 12(3–4): 276–287 **Doi: https://doi.org/10.1007/s12355-010-0040-6** [Accessed 10 May 2026].

Jafarpour M, Adib A, Lotfirad M, Kisi Ö. Spatial evaluation of climate change-induced drought characteristics in different climates based on De Martonne Aridity Index in Iran. Applied Water Science. 2023; 13, Article 133. **Doi: https://doi.org/10.1007/s13201-023-01939-w**

Kenter C, Hoffmann C, Märländer B. Effects of weather variables on sugar beet yield development *(Beta vulgaris* L.). European Journal of Agronomy. 2006; 25(1): 62–69. **Doi: https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.04.004** [Accessed 10 May 2026].

Kiziloglu FM, Sahin U, Kuslu Y, Tunc T. Determining water–yield relationship, water use efficiency, crop and pan coefficients for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in a semi-arid region. Irrigation Science. 2008; 27(1):1–10. **Doi: https://doi.org/10.1007/s00271-008-0118-z**

Koocheki A, Nassiri Mahallati M, Alizadeh A. Ecological agriculture and sustainable development in Iran. Journal of Environmental Studies. 2007; 33(42):1–12. [In Persian]

Li, M., Sun, H., Singh, V. P., Zhou, Y., & Ma, M. 2019. Agricultural water resources management using maximum entropy and entropy-weight-based TOPSIS methods. Entropy, 21(4), 364.

Mäck G, Hoffmann C. Crop growth and nitrogen turnover in sugar beet under drought stress. Sugar Industry. 2017; 142(4): 222–229.

Milford GFJ. Plant structure and crop physiology.pp. 30–49. In: Draycott AP. (Ed). Sugar beet. Oxford: Blackwell Publishing Ltd. 2006.

Mohammadian, R., Moghaddam, M., Rahimian, H., & Sadeghian, S.Y. 2005. Effect of early season drought stress on growth characteristics of sugar beet genotypes. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 29(5), 357–368.

Mohammadian, R., Moghaddam, M., Rahimian, H., & Sadeghian, S.Y. 2005. Effect of early season drought stress on growth characteristics of sugar beet genotypes. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 29(5), 357–368.

Mohammadian, R., Sadeghian, S.Y., Rahimian, H., & Moghadam, M. 2008. Reduced water consumption of dormant-seeded sugar beet in a semiarid climate. Agricultural Water Management, 95(5), 545–552. **Doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.12.004**

Opricovic S, Tzeng GH. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 2004; 156(2): 445–455. **Doi: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1** [Accessed 10 May 2026].

Opricovic, S. 1998. Multicriteria optimization of civil engineering systems. Faculty of civil engineering, Belgrade, 2(1), 5-21.

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.

Payero JO, Melvin SR, Irmak S. Soybean and corn water productivity under deficit irrigation. Agricultural Water Management. 2006; 83(3): 233–243. Doi:https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.10.010 [Accessed 10 May 2026].

Pidgeon JD, Werker AR, Jaggard KW, Richter GM, Lister DH, Jones PD. Climatic impact on the productivity of sugar beet *(Beta vulgaris* L.) in Europe, 1961–1995. Agricultural and Forest Meteorology. 2001; 109(1): 27–37.

Qureshi MRN, Singh RK, Hasan MA. Decision support model to select crop pattern for sustainable agricultural practices using fuzzy MCDM. Environment, Development and Sustainability. 2018; 20(2): 641–659. Doi: https://doi.org/10.1007/s10668-016-9903-7 [Accessed 10 May 2026].

Saaty TL. How to make a decision: The analytic hierarchy process. Europan of Operational research .1990; 48: 9-26.

Shannon CE. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal. 1948; 27(3): 379–423.

Siegel S, Castellan NJ. Nonparametric statistics for the behavioral sciences. McGraw-Hill Book Company, 2nd ed. New York: 1988.

Topak R, Süheri S, Acar B. 2010. Comparison of energy of irrigation regimes in sugar beet production in a semi-arid region. Energy. 35: 5464-5471. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.018.

Tuncel G, Gunturk B. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for agricultural land selection. Sustainability. 2024; 16(23), Article 10509. Doi: https://doi.org/10.3390/su162310509

Yonts CD, Haghverdi A, Reichert L, Koehler A. Irrigation management for sugar beet. In: Proceedings of the 2003 Central Plains Irrigation Conference. Colorado State University. 2003; P.65–72.