



Publisher: Agricultural Research, Education and Extension Organization

Journal of Water Research in Agriculture

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

Determining the Importance of Quinoa Growth Stages in Irrigation Management Using Multi-Criteria Decision-Making Theory

R. Mohammadikia * 

Researcher, On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. rmswri@gmail.com

Article Info

Research Article

Received: April 18, 2026

Accepted: July 11, 2026

Keywords: Irrigation management; Sensitivity analysis; Water productivity

Corresponding author's email: rmswri@gmail.com

Abstract

This study was conducted over two consecutive growing seasons at the research farm of the Soil and Water Research Institute in Karaj, Iran, to identify the most water-sensitive growth stages of quinoa for irrigation management. Crop evapotranspiration (ET_c) was determined using a drainage lysimeter and the water balance method, while the aboveground biomass was measured at the end of each growth stage. Four growth stages (initial, development, mid, and final) were considered as decision alternatives, and two evaluation criteria including biomass water productivity and the proportion of biomass accumulated during each stage were selected. The sensitivity of each growth stage to irrigation management was assessed using two multi-criteria decision-making (MCDM) methods, TOPSIS and VIKOR. In addition, sensitivity analyses were performed to evaluate the effects of changes in criterion weights and the VIKOR compromise parameter (ν). The results showed that total seasonal evapotranspiration was 413 mm, with the highest water consumption occurring during the mid-growth stage. Biomass accumulation followed a sigmoidal growth pattern, with the mid-growth stage accounting for the largest share (57.7%) of the total biomass production. Both TOPSIS and VIKOR consistently identified the mid-growth stage as the most water-sensitive period, followed by the development stage. Sensitivity analysis demonstrated that the ranking of the mid-growth stage remained unchanged across a wide range of criterion weights (0.1–0.8) and VIKOR parameter values ($\nu = 0.1$ –0.9), confirming the robustness of the results. Overall, prioritizing irrigation during the mid-growth stage, and to a lesser extent during the development stage, can maximize biomass production and improve water productivity in quinoa cultivation under semi-arid conditions. The proposed MCDM-based framework provides a robust and practical tool for optimizing irrigation management and enhancing the sustainability of agricultural production in water-limited environments.

Cite this article: Mohammadikia, R., 2026. Determining the Importance of Quinoa Growth Stages in Irrigation Management Using Multi-Criteria Decision-Making Theory. *Journal of Water Research in Agriculture*, 40(1), pp.55-71.



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372532.1113>



تعیین درجه اهمیت مراحل رشد گیاه کینوا به مدیریت مصرف آب با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره

رضا محمدی کیا* 

محقق بخش مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

rmswri@gmail.com

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۱/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۰

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تحلیل
حساسیت، مدیریت آبیاری

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

rmswri@gmail.com

چکیده

این پژوهش باهدف شناسایی مراحل حساس رشد کینوا به مدیریت مصرف آب طی دو سال در شرایط نیمه‌خشک، در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات خاک و آب واقع در کرج اجرا گردید. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه (ETc) با استفاده از لایسمتر زهکش‌دار و روش بیلان آب انجام شد و زیست‌توده اندام هوایی در پایان هر مرحله رشد تعیین گردید. چهار مرحله رشد ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری تعریف شد و دو معیار بهره‌وری آب زیست‌توده و درصد زیست‌توده تولیدی در هر مرحله به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی انتخاب گردید. به‌منظور تعیین درجه حساسیت مراحل رشد به مدیریت مصرف آب از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (Topsis) و ویکور (Vikor) استفاده شد و تحلیل حساسیت نسبت به تغییر وزن معیارها و پارامتر وزنی ویکور (v) نیز انجام شد. نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق کل دوره رشد برابر با ۴۱۳ میلی‌متر بود و بیشترین مقدار آن در مرحله میانی ثبت شد. تجمع زیست‌توده نیز الگوی سیگموئیدی شکل داشت و بیشترین سهم تولید در مرحله میانی (۵۷/۷ درصد) مشاهده شد. هر دو روش مرحله میانی را به‌عنوان حساس‌ترین مرحله رشد به آب شناسایی کردند و مرحله توسعه در رتبه دوم اهمیت قرار گرفت. تحلیل پایداری نشان داد که رتبه مرحله میانی در دامنه گسترده‌ای از تغییر وزن معیارها (۰/۱ تا ۰/۸) و مقادیر مختلف پارامتر وزنی ویکور (v) (۰/۱ تا ۰/۹) ثابت باقی می‌ماند که بیانگر پایداری نتایج بود. به‌طور کلی، تمرکز مدیریت آبیاری در مرحله میانی و تا حدی مرحله توسعه می‌تواند بیشترین تأثیر را بر افزایش زیست‌توده و بهبود بهره‌وری آب در کشت کینوا در شرایط نیمه‌خشک داشته باشد. استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره چارچوبی علمی برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در سطح مزرعه فراهم می‌کند و می‌تواند به ارتقای پایداری تولید در مناطق کم‌آب کمک کند.

استناد: محمدی کیا، رضا، ۱۴۰۵. تعیین درجه اهمیت مراحل رشد گیاه کینوا به مدیریت مصرف آب با استفاده از تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره. نشریه

پژوهش آب در کشاورزی، ۴۰ (۱)، صص. ۵۵-۷۱



DOI: <https://doi.org/10.22092/jwra.2026.372532.1113>

مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa Willd.*) در دهه اخیر به عنوان یکی از محصولات نوظهور و راهبردی در نظام‌های کشاورزی پایدار مطرح شده است. این گیاه که خاستگاه آن نواحی مرتفع آند در آمریکای جنوبی است، به دلیل دامنه سازگاری وسیع خود نسبت به تنش‌های محیطی همچون خشکی، شوری و دمای بالا، توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران بخش کشاورزی را به خود جلب کرده است (بازیل و همکاران، ۲۰۱۹). کینوا به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند تنظیم اسمزی سلولی، بهره‌وری بالای آب و انعطاف‌پذیری فنولوژیک، گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (اکرم و همکاران، ۲۰۲۴؛ گومز و همکاران، ۲۰۱۹).

افزون بر سازگاری محیطی، ارزش تغذیه‌ای بالای کینوا نیز نقش مهمی در گسترش سطح زیر کشت آن دارد. این گیاه دارای پروتئین باکیفیت بالا و حاوی تمام اسیدهای آمینه ضروری، مقادیر قابل توجهی فیبر، ترکیبات آنتی اکسیدانی و عناصر معدنی است و به همین دلیل به عنوان یکی از محصولات کلیدی در بهبود امنیت غذایی و تغذیه‌ای معرفی می‌شود (ویلاکاندو و لدسما، ۲۰۱۷). بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، روند افزایش تولید جهانی کینوا طی سال‌های اخیر بیانگر نقش روبه رشد آن در تنوع‌بخشی به نظام‌های زراعی و سازگاری با تغییر اقلیم است (فائواست، ۲۰۲۵).

در شرایطی که تغییر اقلیم، کاهش بارندگی و افت منابع آب زیرزمینی، کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است، مدیریت دقیق آب آبیاری به یکی از ارکان اصلی پایداری تولید تبدیل شده است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۲۲). ایران نیز به عنوان کشوری با اقلیم غالباً خشک و نیمه‌خشک، با محدودیت شدید منابع آب روبه‌روست و بهبود بهره‌وری آب در بخش کشاورزی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود. در این میان، انتخاب محصولات متحمل به تنش و

تعیین نیاز و حساسیت آبی آن‌ها در مراحل مختلف رشد، از مهم‌ترین راهبردهای سازگاری با کم‌آبی محسوب می‌شود.

تبخیر-تعرق گیاه (ETc) به عنوان شاخصی کلیدی در برآورد نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری، بازتابی از وضعیت فیزیولوژیک، رشد رویشی و فعالیت فتوسنتزی گیاه است و نقش اساسی در ارزیابی بهره‌وری آب دارد (آلن و همکاران ۱۹۹۸؛ پیرا و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که الگوی تبخیر-تعرق کینوا در مراحل مختلف فنولوژیک تفاوت معناداری دارد و حساسیت گیاه به تنش خشکی در برخی مراحل رشد بیش از سایر مراحل است (گیرتز و همکاران، ۲۰۰۸). از این رو، شناسایی مرحله یا مراحل بحرانی رشد از دیدگاه مصرف آب می‌تواند زمینه‌ساز بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری آب شود. در سال‌های اخیر، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDA) در مدیریت منابع آب و کشاورزی توسعه چشمگیری یافته است. این روش‌ها با امکان ترکیب هم‌زمان شاخص‌های کمی و کیفی، چارچوبی نظام‌مند برای انتخاب گزینه‌های بهینه در شرایط پیچیده فراهم می‌کنند (ولاسکویز و هستر، ۲۰۱۳؛ مردانی و همکاران، ۲۰۱۵). از میان این روش‌ها، تکنیک‌های Topsis^۲ و Vikor^۳ به دلیل توانایی در رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و ارائه راه‌حل سازشی، در مطالعات مرتبط با ارزیابی پایداری و مدیریت آب مورد توجه قرار گرفته‌اند (اوپریکویچ و ترنگ، ۲۰۱۸). با وجود گسترش کاربرد این روش‌ها در مقیاس‌های حوضه آبریز و منطقه‌ای، استفاده از آن‌ها در مقیاس مزرعه و به‌ویژه در تحلیل مراحل حساس رشد محصولات زراعی برای مدیریت بهینه آب، همچنان محدود است.

با وجود مطالعات متعدد درباره نیاز آبی، تبخیر-تعرق و پاسخ فیزیولوژیک کینوا به تنش خشکی، اغلب پژوهش‌های پیشین بر بررسی مستقیم اثر رژیم‌های آبیاری بر عملکرد یا صفات فیزیولوژیک گیاه متمرکز بوده‌اند و

کمتر مطالعه‌ای به شناسایی و تعیین درجه حساسیت مراحل رشد گیاه از دیدگاه تصمیم‌گیری تلفیقی پرداخته است. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر شناسایی مراحل حساس رشد کینوا در شرایط نیمه‌خشک کرج با بهره‌گیری از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، به‌کارگیری هم‌زمان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی حساسیت مراحل مختلف رشد کینوا به آب بر اساس ترکیب دو شاخص کلیدی شامل بهره‌وری آب زیست‌توده و سهم تولید زیست‌توده در هر مرحله رشد است. افزون بر این، تحلیل پایداری نتایج نسبت به تغییر وزن معیارها و پارامتر وزنی ۷ در روش ویکور انجام شد تا میزان استحکام و قابلیت اطمینان رتبه‌بندی‌ها ارزیابی گردد. این رویکرد می‌تواند چارچوبی علمی برای شناسایی مراحل بحرانی رشد، بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری آب در شرایط نیمه‌خشک فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

این مطالعه طی دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۹-۱۳۹۸) در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب 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 (متکان و همکاران، ۲۰۱۲). بر اساس گزارش‌های اقلیمی دوره ۱۳۷۰-۱۳۹۹ در منطقه کرج، دمای بیشینه حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه حدود یک درجه سانتی‌گراد بوده است (سازمان هواشناسی ایران، ۱۴۰۰).

منطقه کرج با بارندگی سالانه محدود (حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر) و تبخیر-تعرق پتانسیل بالا است که این

شرایط در بسیاری از سال‌ها منجر به قرار گرفتن گیاه تحت تنش آبی طبیعی می‌شود. دمای متوسط فصل رشد کینوا در این منطقه در محدوده مناسب رشد این گیاه (۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار دارد، اما محدودیت اصلی مربوط به کمبود بارش و بالا بودن تبخیر پتانسیل است که موجب افزایش نیاز آبی آبیاری تکمیلی می‌شود. شاخص‌های اقلیمی نشان می‌دهند که نسبت بارش مؤثر به تبخیر-تعرق پتانسیل در این منطقه پایین بوده و این امر بیانگر غالب بودن شرایط کم‌آبی در طول فصل رشد است.

باوجود این محدودیت‌ها، کینوا به دلیل تحمل نسبتاً بالا به تنش خشکی و سازگاری فیزیولوژیک مناسب، قابلیت کشت در چنین شرایطی را دارد. الگوی رشد گیاه در این منطقه نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت به کمبود آب در مراحل توسعه و میانی رخ می‌دهد؛ زمانی که هم‌زمان با افزایش نیاز تبخیر-تعرقی گیاه، منابع آب طبیعی کافی وجود ندارد؛ بنابراین، اقلیم کرج از نظر دمایی برای رشد کینوا مناسب است، اما از نظر تأمین آب در دسته اقلیم‌های محدودکننده قرار می‌گیرد و موفقیت تولید این محصول وابسته به مدیریت دقیق آبیاری، به‌ویژه در مراحل بحرانی رشد است.

ویژگی‌های خاک و آب محل پژوهش

نتایج آزمون‌های انجام‌شده روی خاک و آب (جدول ۱) حاکی از آن است که خاک مزرعه دارای بافت لوم بوده که ترکیبی متعادل از شن، سیلت و رس است. این بافت باعث فراهم آمدن شرایط مناسب برای زهکشی و نگهداری رطوبت در خاک که برای رشد کینوا ضروری است، می‌شود. همچنین، مقادیر کم شوری و قلیائیت خاک نشان‌دهنده محیطی مناسب برای جذب مؤثر عناصر غذایی و کاهش اثرات منفی شوری برای گیاه است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک
Table 1- Soil physical and chemical properties

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	رطوبت وزنی ظرفیت زراعی FC (%)	رطوبت وزنی نقطه پژمردگی PWP (%)	جرم مخصوص ظاهری Bd (g cm ⁻³)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	اسیدیته pH	کربن آلی OC (%)	نیتروژن کل N (%)	فسفر قابل جذب P (ppm)	پتاسیم قابل جذب K (ppm)
0-30	Loam	19.2	9.5	1.52	0.72	7.7	0.55	0.06	7.2	230
30-60	Loam	18.8	8.5	1.58	0.58	7.8	0.41	0.05	6.8	220

لایسیمتر فراهم می‌آورد. این خصوصیات به‌طور کلی تضمین می‌کنند که داده‌های مربوط به تبخیر-تعرق ثبت‌شده، نمایانگر شرایط واقعی مزرعه بوده و می‌توان از آن‌ها در مدیریت بهینه آبیاری استفاده کرد.

در مورد آب آبیاری، باتوجه به هدایت الکتریکی کم و نسبت کاتیون مناسب آن (جدول ۲)، این ویژگی‌ها خطر تجمع نمک در ناحیه ریشه گیاه را کاهش داده و شرایط مطلوبی را برای انجام آزمایش تبخیر-تعرق با

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری
Table 2- Chemical properties of irrigation water

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

تنک کردن، تعداد بوته‌ها به ۱۴ تا ۱۵ بوته رسید. لایسیمترها دو متر طول، یک متر عرض و ۱/۲ متر عمق داشتند. برای کاهش تأثیر محیط اطراف، ناحیه‌ای با مساحت ۴۰۰ برابر سطح هر لایسیمتر به‌عنوان کشت حاشیه‌ای در نظر گرفته شد. طبق گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و تحقیقات ابوخال و همکاران (۱۹۸۲)، این اندازه به‌عنوان حاشیه محافظتی مناسب برای کاهش اثرات محیطی اطراف لایسیمتر، به‌ویژه در مناطق خشک، توصیه شده است. تصاویر مربوط به مزرعه آزمایشی کینوا در شکل (۱) ارائه شده است.

عملیات زراعی

در این پژوهش، طی دو سال، کینوا رقم تی‌تی کاکا کشت شد. تاریخ‌های کشت در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب ۱۲ مرداد و ۲۵ تیرماه و تاریخ برداشت به ترتیب ۱۱ آبان و ۲۳ مهر بود. پس از آماده‌سازی زمین، بذرها به‌صورت فشرده داخل لایسیمتر و اطراف آن کشت شد، به‌طوری‌که در هر ۳۰ سانتی‌متر، ۱۰ بذر کاشته شد. پس از جوانه‌زنی و تنک کردن، فاصله بوته‌ها روی ردیف کشت در محدوده ۲۵ تا ۳۵ سانتی‌متر تنظیم شد. در داخل لایسیمترها، دو ردیف کینوا کشت شد و پس از عملیات

شکل ۱- تصویر مزرعه آزمایشی کینوا
Figure 1- Experimental field of quinoa crop

پتانسیل گیاه به کار گرفته شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ هاول و همکاران، ۱۹۹۱).

عمق آبیاری (I) در هر نوبت بر اساس کسری آب خاک در ناحیه ریشه از رابطه (۱) محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$I = (F_C - \theta) * Z_r \quad (1)$$

که در آن:

I: عمق آب آبیاری (mm)

F_C: رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی (%)

θ: رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری (%)

Z_r: عمق مؤثر ریشه (mm)

برای تعیین عمق مؤثر ریشه با فرض عمق نهایی ۰/۷ متر، در ۲۰ روز ابتدایی رشد، عمق مؤثر ریشه معادل ۳۰ درصد عمق نهایی در نظر گرفته شد. در مرحله توسعه (۳۰ روز) و مرحله میانی (۲۵ روز)، این مقدار برابر با ۶۰ درصد عمق نهایی لحاظ شد و در مرحله پایانی رشد، ۱۰۰ درصد عمق نهایی به عنوان عمق مؤثر ریشه منظور شد؛ به گونه ای که در هر نوبت آبیاری، کمبود رطوبتی در کل پروفیل ریشه تا ظرفیت زراعی جبران می شد. با توجه به اینکه توسعه ریشه در طول فصل رشد ماهیتی غیرخطی دارد، به منظور کاهش خطای ناشی از فرض افزایش پله ای عمق مؤثر ریشه، پس از برداشت محصول و تعیین عمق نهایی ریشه در مزرعه، روند توسعه ریشه با استفاده از معادله غیرخطی برگ و یامادا (۱۹۸۶) شبیه سازی شد و مقادیر نیاز آبی بر اساس عمق شبیه سازی شده مجدداً اصلاح شد.

داده های بارندگی مورد استفاده از ایستگاه هواشناسی مشکین دشت دریافت و در محاسبات بیلان آب منظور شد. با توجه به عمق زیاد لایسیمتر نسبت به توسعه ریشه، لایه های زیر ناحیه ریشه نقش یک مخزن ذخیره را ایفا می کردند و تنها در شرایط آبیاری بیش از حد، مقدار اندکی زهاب تولید می شد که به صورت منظم جمع آوری و در بیلان آب لحاظ شد. پایش رطوبت خاک در ناحیه ریشه مؤثر با استفاده از حسگرهای TDR Trace Model

توصیه کودی بر اساس نتایج آزمون خاک و باهدف حداقل سازی مصرف نهاده های پراورزی و افزایش کارایی جذب عناصر غذایی تنظیم شود. نیتروژن به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار به صورت کود اوره مصرف شد که ۳۰ درصد آن هنگام کاشت و بقیه در مرحله ۶-۸ برگی گیاه به صورت سرک اعمال شد. فسفر به میزان ۷۵ کیلوگرم در هکتار به صورت سوپر فسفات تریپل و به طور کامل پیش از کاشت، به صورت نواری در خاک قرار داده شد. با توجه به مقدار متوسط پتاسیم خاک، ۶۰ کیلوگرم کود پتاس به صورت کلرید پتاسیم در هکتار برای حفظ توازن تغذیه ای، جلوگیری از تثبیت پتاسیم در خاک و تضمین جذب مناسب آن در مراحل ابتدایی رشد گیاه اعمال شد.

برای بهبود وضعیت فیزیکی و زیستی خاک و همچنین افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک، کود دامی کاملاً پوسیده به میزان ۱۰ تن در هکتار پیش از کاشت به خاک افزوده شد. علاوه بر این، با توجه به ویژگی های آهکی خاک، سولفات روی به میزان ۱۲ کیلوگرم در هکتار به عنوان کود پایه مصرف شد. این راهکار تغذیه ای با هدف کاهش تلفات عناصر غذایی، بهبود بهره وری آب و انرژی و ارتقای پایداری سیستم کشت کینوا طراحی شد.

عملیات کنترل علف های هرز، مبارزه با آفات و بیماری ها طبق دستورالعمل های فنی و به منظور حفظ رشد مطلوب گیاه انجام شد. محصول در زمان رسیدگی کامل برداشت و سپس برای مراحل بعدی آزمایش های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آماده سازی شد.

اندازه گیری تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه

در این تحقیق، برای اندازه گیری تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (ET_c)، از معادله بیلان آب استفاده شد. آبیاری لایسیمترها به صورت دستی بود و آبیاری حاشیه آن به روش تیپ (Tape) انجام شد. آبیاری زمانی انجام می شد که رطوبت خاک در ناحیه ریشه به حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی کاهش می یافت. این روش طبق اصول پذیرفته شده برای لایسیمتر زهکش دار به منظور اندازه گیری تبخیر-تعرق

6050X انجام شد و تغییرات ذخیره آب خاک بر اساس داده‌های حاصل از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد.

اندازه‌گیری زیست‌توده اندام هوایی گیاه

در پایان هر یک از مراحل رشد، با نمونه‌برداری از گیاه کینوا در واحد سطح، وزن تر زیست‌توده اندام هوایی گیاه (Biomass) اندازه‌گیری شد و میزان افزایش زیست‌توده نسبت به مرحله رشد پیشین محاسبه شد. بدین ترتیب، برای هر مرحله رشد، مقدار زیست‌توده تولیدشده (افزایش‌یافته) متناظر با تبخیر-تعرق صورت‌گرفته تعیین شد. میانگین مقادیر زیست‌توده و بهره‌وری آب آن در هر سال زراعی و برای هر مرحله رشد، به‌عنوان داده‌های ورودی در ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره مورد استفاده قرار گرفتند.

تجزیه آماری و تحلیل چندمعیاره

با توجه به محدود بودن تعداد تکرارهای آزمایش (دو لایسمتر در هر سال و طی دو سال اجرای پژوهش)، امکان به‌کارگیری مدل‌های آماری پیچیده با توان بالا فراهم نبود. از این‌رو، تحلیل آماری داده‌ها به بررسی‌های توصیفی شامل محاسبه میانگین و انحراف معیار تبخیر-تعرق و زیست‌توده در مراحل مختلف رشد محدود شد. در شرایطی که حجم داده‌ها محدود باشد، بهره‌گیری از روش‌های تحلیل چندمعیاره به‌عنوان رویکردی معتبر و کارآمد برای استخراج نتایج کاربردی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح مزرعه شناخته می‌شود (اپریکویک و تزننگ، ۲۰۰۴). این رویکرد امکان در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا حتی در شرایط کمبود داده‌های دقیق، گزینه‌های مناسب و بهینه را شناسایی نمایند.

نتایج پژوهش‌های متعدد نشان داده است که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، حتی در مواجهه با عدم قطعیت یا اطلاعات ناقص، ابزارهای توانمندی برای انتخاب

الگوی کشت، مدیریت بهینه منابع آب‌و خاک و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های کشاورزی به شمار می‌روند (قریشی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بیسواس و همکاران، ۲۰۲۴؛ تانسل و گان‌ترک، ۲۰۲۴). بر این اساس، استفاده از این روش‌ها می‌تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری سامانه‌های کشاورزی و حمایت از تصمیم‌گیری در شرایط واقعی ایفا کند (بهراسی‌من و همکاران، ۲۰۲۵).

در این پژوهش، به‌منظور تعیین مرحله رشد بهینه از دیدگاه ایجاد تعادل میان تولید زیست‌توده و بهره‌وری آب زیست‌توده اندام هوایی گیاه از روش‌های Topsis و Vikor استفاده شد.

روش Topsis به دلیل توانایی در ارزیابی هم‌زمان چندین معیار با مقیاس‌ها و اوزان متفاوت، یکی از روش‌های کارآمد تصمیم‌گیری چندمعیاره در مطالعات کشاورزی و مدیریت منابع محسوب می‌شود. اجرای این روش شامل مراحل زیر بود: ابتدا، ماتریس تصمیم تشکیل شد که در آن گزینه‌ها (مراحل مختلف رشد گیاه) در سطرها و معیارهای ارزیابی در ستون‌ها قرار گرفت، به‌طوری‌که هر درایه نشان‌دهنده عملکرد یک مرحله رشد نسبت به یک معیار مشخص بود. به‌منظور قابل‌مقایسه شدن معیارها و حذف اثر واحدهای اندازه‌گیری متفاوت، ماتریس تصمیم با استفاده از روش نرمال‌سازی برداری استاندارد شد. در مرحله بعد، به‌منظور جلوگیری از اعمال سوگیری ذهنی در تعیین اهمیت نسبی معیارها، در تحلیل پایه، وزن معیارها به‌صورت برابر (۵۰-۵۰) در نظر گرفته شد و در مقادیر ماتریس نرمال‌شده اعمال شد تا ماتریس نرمال‌شده وزنی حاصل شود. سپس، راه‌حل ایده‌آل مثبت (بهترین مقدار ممکن برای هر معیار) و راه‌حل ایده‌آل منفی یا ضد ایده‌آل (بدترین مقدار ممکن) تعیین شد. فاصله هر گزینه از این دو راه‌حل با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه شد. در ادامه، شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل محاسبه شد که مقدار آن بین صفر و یک قرار دارد. مقادیر بزرگ‌تر این شاخص بیانگر نزدیکی بیشتر گزینه به وضعیت ایده‌آل و مطلوب‌تر بودن آن است، درحالی‌که مقادیر

کوچک‌تر نشان‌دهنده فاصله بیشتر از وضعیت مطلوب هست. در نهایت، مراحل رشد گیاه بر اساس مقدار این شاخص به‌صورت نزولی رتبه‌بندی شدند و گزینه‌ای که بیشترین نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و بیشترین فاصله از راه‌حل ضد ایده‌آل را داشت، به‌عنوان گزینه برتر معرفی شد. روش Vikor به‌عنوان روش دوم برای شناسایی راه‌حل سازشی در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره به کار گرفته شد. در این روش، ابتدا ماتریس تصمیم بر اساس مقادیر میانگین هر معیار برای مراحل مختلف رشد گیاه تشکیل شد. سپس، بهترین و بدترین مقدار هر معیار تعیین شد؛ به‌گونه‌ای که برای معیارهای سودمند، بیشترین مقدار به‌عنوان مقدار ایدئال و کمترین مقدار به‌عنوان مقدار نامطلوب در نظر گرفته شد. در مرحله بعد، فاصله نسبی هر گزینه از مقدار ایدئال برای هر معیار با در نظر گرفتن وزن معیارها محاسبه شد. بر این اساس، 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 Vikor (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 شد. 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.

برای شناسایی مراحل حساس رشد به آب چهار مرحله رشد کینوا شامل مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی به‌عنوان گزینه‌های ماتریس تصمیم در نظر گرفته شد. همچنین، مقادیر درصد زیست‌توده تولیدی (kg/h) هر مرحله رشد و بهره‌وری آب گیاه در تولید زیست‌توده اندام هوایی در هر مرحله رشد به‌عنوان معیارهای تصمیم انتخاب شد. در این چارچوب، زیست‌توده تولیدی و بهره‌وری آب هر دو به‌عنوان معیار مثبت (سود) تعریف شدند. منظور از معیار مثبت این است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد مطلوب‌تر است (جدول ۳).

جدول ۳- ماتریس تصمیم تحلیل چندمعیاره

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

گزینه‌ها (Alternatives)	بهره‌وری آب زیست‌توده تولیدی (Water Productivity of Biomass) (Kg m^{-3}) (+)	درصد زیست‌توده تولیدی در هر مرحله رشد (Percentage of Biomass at Each Growth Stage) (+)
مرحله ابتدایی (سبز شدن تا غنچه‌دهی) Initial stage (emergence to budding)	0.64	5.8%
مرحله توسعه (غنچه‌دهی تا قبل از گل‌دهی) Development stage (budding to pre-flowering)	1.48	29.0%
مرحله میانی (گل‌دهی تا تغییر رنگ و پر شدن دانه) Mid stage (flowering to seed filling)	2.03	57.7%
مرحله پایانی (تغییر رنگ و پر شدن دانه تا برداشت محصول) Final stage (ripening to harvest)	2.12	7.5%

تحلیل پایداری نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها

در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره، یکی از چالش‌های اصلی، تعیین اهمیت نسبی معیارهاست؛ چرا که وزن‌دهی متفاوت به معیارها می‌تواند منجر به تغییر در رتبه‌بندی گزینه‌ها شود. از آنجاکه مراحل مختلف رشد گیاه کینوا دارای ویژگی‌های فیزیولوژیک، نیازهای آبی و سهم‌های متفاوتی در عملکرد نهایی هستند، ارزیابی آن‌ها تنها بر اساس یک ترکیب وزنی نمی‌تواند بیانگر

واقعیت‌های مزرعه‌ای باشد. به همین دلیل، استفاده از ترکیب‌های وزنی مختلف به‌عنوان یک رویکرد علمی-کاربردی، امکان بررسی حساسیت رتبه‌بندی مراحل رشد نسبت به تغییر اولویت‌ها را فراهم می‌سازد؛ بنابراین، در این پژوهش ترکیب‌های وزنی دیگر در دامنه مشخص و بر اساس تغییر وزن معیارها تعریف شد و رتبه‌بندی مراحل چهارگانه رشد کینوا انجام شد.

تحلیل پایداری نسبت به تغییر وزن معیارها با رویکرد مدیریتی

به منظور ارزیابی میزان پایداری نتایج هر دو روش Vikor و Topsis در رتبه‌بندی گزینه‌ها در برابر تغییر وزن معیارها، تحلیل حساسیت روی اوزان معیارها انجام شد. در این راستا، وزن هر یک از معیارها به صورت تدریجی در بازه ۰/۱ تا ۰/۸ و با گام‌های ۰/۰۵ تغییر داده شد. به طور هم‌زمان، وزن معیار مقابل به گونه‌ای تعدیل شد که مجموع اوزان در تمامی سناریوها برابر با یک باقی بماند. این رویکرد امکان بررسی تأثیر تغییر اولویت معیارها بر جایگاه نهایی گزینه‌ها را فراهم کرده و به شناسایی گزینه‌هایی با رتبه پایدار و مقاوم در برابر تغییر اوزان معیارها کمک نمود.

تحلیل پایداری نسبت به تغییر ضریب وزن V

علاوه بر این، به منظور بررسی حساسیت نتایج روش Vikor نسبت به پارامتر تصمیم‌گیری V که بیانگر درجه ترجیح بین استراتژی اکثریت معیارها و معیار با بیشترین نارضایتی است، مقادیر مختلف این پارامتر در بازه ۰/۱ تا ۰/۹ و با گام‌های ۰/۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحلیل امکان ارزیابی میزان وابستگی رتبه‌بندی نهایی به انتخاب مقدار پارامتر V و بررسی پایداری گزینه برتر تحت سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری را فراهم ساخت. کلیه محاسبات عددی و تحلیل‌های مرتبط با ارزیابی حساسیت، با استفاده از محیط برنامه‌نویسی Python انجام شد. به منظور نمایش شفاف اثر تغییر وزن معیارها و پارامتر V بر رتبه گزینه‌ها، نمودارهای تغییر رتبه بر حسب وزن معیارها (Weight-Rank) و نمودارهای حساسیت نسبت به پارامتر V به صورت گرافیکی ارائه شدند تا روند جابه‌جایی رتبه‌ها و میزان پایداری نتایج به وضوح قابل مشاهده باشد.

نتایج و بحث

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

میانگین دوره رشد کینوا در کرج طی سال‌های اجرای پژوهش ۹۰ روز بود. در هر سال، طول مراحل رشد گیاه بر اساس خصوصیات فنولوژیکی گیاه توسط کارشناسان مؤسسه تحقیقات اصلاح و بذریه در مزرعه تعیین شد. بر این اساس، طول مرحله ابتدایی رشد (سبز شدن تا غنچه‌دهی) ۲۰ روز، مرحله توسعه (غنچه‌دهی تا گل‌دهی) ۳۰ روز، مرحله میانی (از گل‌دهی تا تغییر رنگ و پرشدن دانه) ۲۵ روز و مرحله پایانی (از تغییر رنگ و پرشدن دانه تا برداشت محصول) ۱۵ روز بود. تبخیر-تعرق کینوا برای کل دوره رشد ۴۱۳/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. مقدار آن از $3/6 \pm 61/9$ میلی‌متر در مرحله ابتدایی رشد به $13/3 \pm 193/9$ میلی‌متر در مرحله میانی رسید و سپس در مرحله پایانی به $0/99 \pm 24/1$ میلی‌متر کاهش یافت. بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، زیست‌توده کینوا از 18 ± 396 کیلوگرم در هکتار در مرحله اولیه رشد به 239 ± 6816 کیلوگرم در مرحله پایانی افزایش یافت که نشان‌دهنده رشد پیوسته و تجمع ماده خشک به‌ویژه در مراحل میانی و پایانی بود. نتایج سال‌های آزمایشی نشان داد که تجمع زیست‌توده کینوا در طول دوره رشد دارای الگوی سیگموتیدی بود؛ به‌طوری‌که پس از رشد کند اولیه، سرعت افزایش زیست‌توده در مرحله توسعه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و در مراحل میانی و پایانی به حالت تقریباً پایدار رسید. این الگو نشان می‌دهد که دوره رشد میانی و توسعه، مهم‌ترین مراحل برای تجمع ماده خشک و بهبود عملکرد نهایی محصول هستند. میانگین و انحراف معیار زیست‌توده و تبخیر - تعرق (ETC) مراحل مختلف رشد کینوا (میانگین دو سال) در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- میانگین و انحراف از استاندارد مقادیر تبخیر-تعرق و زیست توده در مراحل مختلف رشد

Table 4- Mean and Standard Deviation of Evapotranspiration and Biomass at Different Growth Stages

مرحله رشد Growth stage	تبخیر-تعرق Evapotranspiration (mm)	وزن زیست توده تولیدی Biomass production (kg ha ⁻¹)	وزن زیست توده تجمعی Cumulative biomass (kg ha ⁻¹)
مرحله ابتدایی (سبز شدن تا غنچه دهی) Initial stage (emergence to budding)	61.9 ± 3.6	396 ± 18	396
مرحله توسعه (غنچه دهی تا گل دهی) Development stage (budding to flowering)	133.3 ± 10.0	1973 ± 53	2369
مرحله میانی (گل دهی تا تغییر رنگ) Mid stage (flowering to ripening)	193.9 ± 13.3	3936 ± 31	6305
مرحله پایانی (تغییر رنگ تا برداشت) Final stage (ripening to harvest)	24.1 ± 0.99	511 ± 24	6816

مصرف آب و تولید ماده خشک وجود دارد. در مجموع، نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می دهد که بخش عمده تولید زیست توده و کارایی مصرف آب کینوا در مراحل توسعه و به ویژه میانی رشد رخ می دهد.

شناسایی مراحل حساس رشد کینوا به مدیریت مصرف آب

تحلیل با استفاده از روش Topsis نشان داد که مرحله میانی رشد بالاترین نمره را کسب کرده است (۰/۹۷۱) و بهترین عملکرد را از نظر بهره وری آب^۴ (WP) و تولید زیست توده دارد. مرحله ابتدایی کمترین نمره را دارد (۰/۰۰۰) و در رتبه چهارم قرار گرفته است، در حالی که مرحله توسعه و مرحله نهایی به ترتیب رتبه دوم و سوم را به خود اختصاص داده اند. شاخص نزدیکی Topsis (Ci) و رتبه هر یک از مراحل رشد در جدول (۵) و شکل (۲) ارائه شده است.

یافته های حاضر با نتایج مطالعات پیشین در زمینه نیاز آبی، تبخیر-تعرق و تولید زیست توده کینوا همخوانی دارد. در پژوهش حاضر، تبخیر-تعرق فصلی کینوا ۴۱۳/۵ میلی متر و زیست توده نهایی ۶۸۱۶ کیلوگرم در هکتار اندازه گیری شد. در مطالعه گیرتز و همکاران (۲۰۰۳) در شرایط نیمه خشک بولیوی، نیاز آبی فصلی کینوا حدود ۳۵۰ تا ۵۰۰ میلی متر گزارش شد که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. همچنین گارسیا و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که تبخیر-تعرق فصلی کینوا بسته به شرایط اقلیمی بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی متر متغیر بوده و بیشترین مصرف آب در مرحله میانی رشد رخ می دهد. نتایج هینوجوسا و همکاران (۲۰۱۹) بیانگر آن است که زیست توده هوایی کینوا در شرایط مختلف آبیاری بین ۶۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بوده و بیشترین نرخ تجمع ماده خشک در مراحل میانی رشد مشاهده می شود. همچنین گیرتز و همکاران (۲۰۰۸ و ۲۰۰۹) گزارش کردند که افزایش تبخیر-تعرق تا سطح بهینه، موجب افزایش معنی دار عملکرد و زیست توده کینوا شده و رابطه ای مستقیم بین

جدول ۵- رتبه‌بندی مراحل رشد کینوا به روش تاپسیس

Table 5- Ranking of Quinoa Growth Stages Using the Topsis Method

مرحله رشد / (Growth stage)	شاخص نزدیکی / (Closeness Coefficient)	رتبه / (Rank)
مرحله ابتدایی (سبز شدن تا غنچه‌دهی) Initial stage (emergence to budding)	0.000	4
مرحله توسعه (غنچه‌دهی تا گل‌دهی) Development stage (budding to flowering)	0.476	2
مرحله میانی (گل‌دهی تا تغییر رنگ) Mid stage (flowering to ripening)	0.971	1
مرحله پایانی (تغییر رنگ تا برداشت) Final stage (ripening to harvest)	0.365	3

قرار گرفت، درحالی‌که مرحله ابتدایی به دلیل دارا بودن بیشترین مقادیر S و Q، بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل داشته و از نظر عملکرد کلی در پایین‌ترین رتبه قرار گرفت. این تحلیل نشان می‌دهد که روش Vikor قادر است گزینه‌ای که هم بهینه و هم متعادل در تمامی معیارها است را شناسایی کند و ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری پژوهشی و عملیاتی در شناسایی مرحله رشد بهینه برای مدیریت منابع آب فراهم آورد. شاخص‌های S، R و Q به شرح جدول (۶) و رتبه‌بندی مراحل رشد در شکل (۳) ارائه شده است.

نتایج محاسبات روش چندمعیاره Vikor نشان داد که مرحله میانی با کمترین مقدار Q (0.0000) بهترین عملکرد را دارد؛ این مرحله علاوه بر کم بودن فاصله مجموع از بهترین معیارها (S)، دارای حداکثر فاصله کمتر از وضعیت ایده‌آل در بین معیارها (R) نیز بود که نشان می‌دهد عملکرد آن متوازن و کم‌ریسک است. مرحله توسعه با وجود فاصله اندک از گزینه برتر، به دلیل برخورداری از کمترین مقدار شاخص حداکثر انحراف (R)، رتبه دوم را کسب کرد که بیانگر عملکرد متعادل این مرحله در تمامی معیارهای مورد ارزیابی است. مرحله پایانی در رتبه سوم

جدول ۶- رتبه‌بندی مراحل رشد کینوا به روش ویکور

Table 6- Ranking of Quinoa Growth Stages Using the Vikor Method

مرحله رشد / (Growth stage)	S (Weighted Sum)	R (Weighted Max)	Qi (Vikor Index)	رتبه
مرحله ابتدایی (سبز شدن تا غنچه‌دهی) Initial stage (emergence to budding)	1.0000	0.5000	1.0000	4
مرحله توسعه (غنچه‌دهی تا گل‌دهی) Development stage (budding to flowering)	0.4927	0.2765	0.5004	2
مرحله میانی (گل‌دهی تا تغییر رنگ) Mid stage (flowering to ripening)	0.0304	0.0304	0.0000	1
مرحله پایانی (تغییر رنگ تا برداشت) Final stage (ripening to harvest)	0.4836	0.4836	0.7163	3

Si: Total distance of each option from the ideal state across all criteria

Ri: Maximum individual impact of each criterion on the option

Qi: Final Vikor index (with equal weights and $v = 0.5$) determining the final ranking

مطلوب، کمترین فاصله از حالت ایدئال و بیشترین فاصله از حالت نامطلوب را دارا باشد. در مقابل، روش Vikor با تمرکز بر مفهوم راه‌حل سازشی، از ترکیب دو شاخص S (مجموع انحرافات وزن‌دار معیارها از مقدار ایدئال) و R (بیشترین انحراف وزن‌دار در میان معیارها) برای ارزیابی گزینه‌ها بهره می‌گیرد. شاخص نهایی Q نیز با استفاده از پارامتر v محاسبه

مقایسه نتایج حاصل از دو روش Topsis و Vikor نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روش در این مطالعه به رتبه‌بندی یکسانی از مراحل رشد منجر شدند، اما از سازوکارهای مفهومی و محاسباتی متفاوتی برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده می‌کنند. روش Topsis رتبه‌بندی گزینه‌ها را بر اساس فاصله اقلیدسی هر گزینه از راه‌حل ایدئال مثبت و راه‌حل ضد ایدئال انجام می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که گزینه

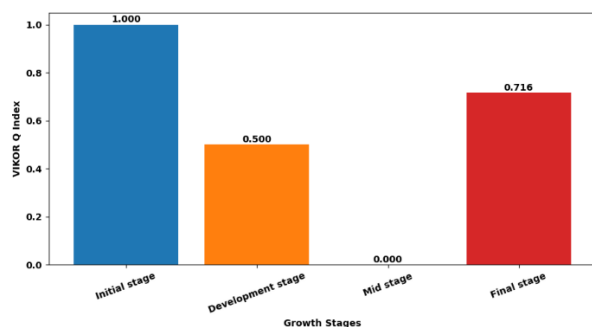
می‌شود که نقش تنظیم‌کننده تعادل بین دیدگاه گروهی (اکثریت معیارها) و دیدگاه فردی (بدترین عملکرد گزینه) را ایفا می‌کند.

تطابق کامل نتایج Topsis و Vikor در این پژوهش را می‌توان به برتری آشکار مرحله میانی رشد در هر دو معیار مورد بررسی و همچنین ماهیت سودمند بودن معیارها نسبت داد. در چنین شرایطی، فاصله گزینه برتر از سایر گزینه‌ها به اندازه‌ای مشخص است که هر دو روش به نتیجه‌ای همگرا دست می‌یابند. با این حال، در مسائل پیچیده‌تر که شامل معیارهای متضاد، معیارهای هزینه‌ای یا سطوح بالاتری از عدم قطعیت هستند، احتمال بروز اختلاف در رتبه‌بندی‌های حاصل از Topsis و Vikor افزایش می‌یابد. این موضوع اهمیت به کارگیری هم‌زمان چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۵) را به منظور افزایش قابلیت اطمینان و پایداری نتایج در فرایند تصمیم‌گیری نشان می‌دهد.

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات داخلی و خارجی در زمینه رشد، نیاز آبی و تجمع زیست‌توده کینوا همخوانی دارد. به عنوان مثال، میرصفی و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که بیشترین تجمع ماده خشک در مراحل توسعه تا میانی رخ می‌دهد و مدیریت بهینه آبیاری باید بر این بازه زمانی متمرکز شود. در مطالعه‌ای در چین، لی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که بهره‌وری آب در مراحل گلدهی تا پر شدن دانه به بیشترین مقدار خود می‌رسد و این دوره از نظر مدیریت آبیاری اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین گومز و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تجمع زیست‌توده کینوا در مراحل توسعه تا میانی بیشینه بوده و

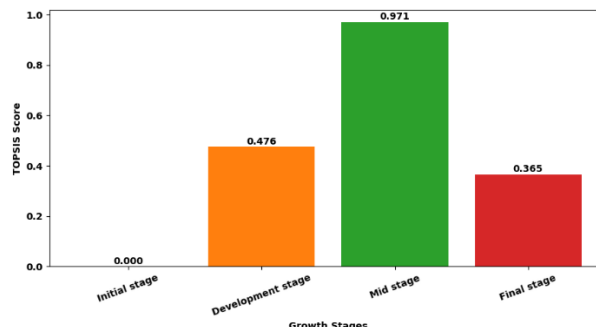
الگوی رشد گیاه از الگوی سیگموئیدی (S شکل) پیروی می‌کند. در مجموع، این نتایج تأیید می‌کنند که مرحله میانی رشد از نظر تعادل بین مصرف آب و تولید زیست‌توده مهم‌ترین مرحله در رشد کینوا است و تمرکز مدیریت آبیاری در این دوره می‌تواند به بهبود عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب منجر شود.

مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که حساسیت کینوا به کمبود آب به شدت وابسته به مرحله رشد است. آوا و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که تجمع ماده خشک پس از مرحله استقرار اولیه به سرعت افزایش یافته و در مراحل گلدهی و پر شدن دانه به حداکثر می‌رسد؛ بنابراین این مراحل از حساس‌ترین دوره‌ها نسبت به محدودیت آب محسوب می‌شوند. همچنین اوستانی و همکاران (۲۰۲۳) در شرایط اقلیم گرم و خشک نشان دادند که نرخ رشد و تجمع ماده خشک پس از مراحل اولیه به طور قابل توجهی افزایش یافته و بیشترین توسعه اندام‌های هوایی در دوره میانی رشد رخ می‌دهد. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهد که مراحل توسعه و به ویژه میانی رشد نقش کلیدی در تولید زیست‌توده و تعیین نیاز آبی کینوا دارند. همچنین سلیم و همکاران (۲۰۲۲) بیان کردند که تنش آبی در مراحل زایشی مانند گلدهی و پر شدن دانه موجب کاهش شدیدتر عملکرد می‌شود، در حالی که مراحل رویشی نسبت به کمبود آب تحمل بیشتری دارند؛ بنابراین، تمرکز مدیریت آبیاری بر مراحل توسعه و میانی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش پایداری تولید و بهبود بهره‌وری آب در کشت کینوا داشته باشد.



شکل ۳- نمودار رتبه‌بندی حساسیت مراحل رشد به آب در روش ویکور

Figure 3- Ranking chart of growth stage sensitivity to water using the VIKOR method



شکل ۲- نمودار رتبه‌بندی حساسیت مراحل رشد به آب در روش تاپسیس

Figure 2- Ranking chart of growth stage sensitivity to water using the Topsis method

دوره‌ای با نیاز آبی بالا است که تأمین آب در آن تأثیر زیادی بر زیست‌توده نهایی و عملکرد کلی دارد. این موضوع با یافته‌های مطالعه حاضر همسو است که مرحله میانی را از نظر ترکیب بهره‌وری آب و زیست‌توده حساس‌ترین مرحله رشد به آب شناسایی کرده است. شناسایی این مرحله در مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره با این ایده همخوانی دارد که مراحل رویشی و آغاز تولیدمثل نسبت به دوره‌های پرتقاضای تولیدمثل مانند گل‌دهی و پر شدن دانه آسیب‌پذیری کمتری دارند (سلیم و همکاران، ۲۰۲۲).

در مجموع تطابق بین نتایج تحلیل چندمعیاره و ارزیابی‌های میدانی حساسیت رشد اعتبار اکولوژیکی شناسایی مرحله میانی به‌عنوان مرحله حساس به آب را تأیید می‌کند به‌ویژه در شرایطی که مصرف آب و تولید زیست‌توده باید به‌طور هم‌زمان مدنظر قرار گیرد. با این حال مطالعات نشان می‌دهند که مهم‌ترین دوره‌ها برای کاهش غیرقابل‌بازگشت عملکرد معمولاً در اطراف گل‌دهی و پر شدن دانه رخ می‌دهد که باید در تفسیر حساسیت مراحل رشد به آب لحاظ شود (گامز و همکاران، ۲۰۱۹؛ گنزالس و همکاران، ۲۰۲۴).

تحلیل پایداری رتبه‌بندی مراحل رشد

تحلیل پایداری وزن معیارها (بهره‌وری آب زیست‌توده و وزن زیست‌توده اندام هوایی گیاه) در هر دور روش Topsis و VIKOR، نشان می‌دهد که حتی با تغییر وزن بهره‌وری آب از ۰/۱ تا ۰/۸ و وزن زیست‌توده از ۰/۹

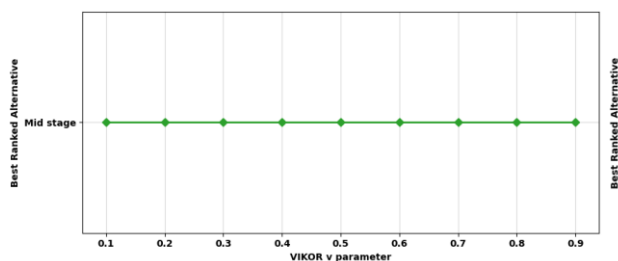
آزمایش‌هایی که تأثیر آبیاری محدود بر کینوا را بررسی کرده‌اند نشان داده‌اند که عملکرد و بهره‌وری آب به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر کمبود آب در زمان گل‌دهی و پر شدن دانه قرار می‌گیرد، درحالی‌که تنش آبی در مراحل اولیه رویشی اثر منفی کمتری دارد و در برخی موارد باعث افزایش شاخص‌های بهره‌وری آب می‌شود (میر صفی، ۲۰۲۴).

در یک مطالعه گسترده روی مصرف آب در مراحل مختلف رشد کینوا مشاهده شد که مصرف آب در مرحله پر شدن دانه بیشترین مقدار را دارد و در مراحل میانی رشد نیز مقادیر بالای مصرف آب ثبت شد که اهمیت این دوره‌ها را در مدیریت آب نشان می‌دهد (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). یافته‌های دیگر نشان داده‌اند که واکنش فیزیولوژیک گیاه مانند تنظیم روزنه و ظرفیت نهایی تبخیر و تعرق تحت تنش آبی باعث کاهش رشد و عملکرد می‌شود به‌ویژه در مراحل حساس مانند گل‌دهی (گنزالس و همکاران، ۲۰۲۴).

علاوه بر این، مطالعات تجربی عملکرد و خصوصیات دانه‌ها نیز گزارش می‌دهند که تنش آبی به‌ویژه در مرحله پر شدن دانه می‌تواند صفات فیزیولوژیک و کیفیت محصول را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد؛ زیرا کاهش نرخ فتوسنتز و هدایت روزنه باعث کاهش عملکرد و افزایش تنش می‌شود (گامز و همکاران، ۲۰۱۹).

این مطالعات نشان می‌دهند که باوجود پاسخ‌های متفاوت مراحل رشد به کمبود آب مرحله میانی رشد معمولاً

این پایداری و حساسیت، ناشی از تفاوت دامنه و حساسیت معیارها، همبستگی و تعارض بین معیارها و وزن‌دهی نسبی شاخص‌ها است. گزینه‌هایی که عملکرد متوازن و قوی در تمامی معیارهای کلیدی دارند، مانند مرحله میانی، نسبت به تغییر وزن‌ها کمتر آسیب می‌بینند، درحالی‌که گزینه‌هایی با عملکرد پراکنده، مانند مراحل ابتدایی و پایانی، وابستگی بالایی به وزن معیارها دارند و ناپایدار هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مرحله میانی رشد کینوا به‌عنوان مرحله کلیدی و حساس به آب شناسایی می‌شود و تمرکز بر تأمین آب، کنترل تنش‌ها و مدیریت نهاده‌های کشاورزی در این مرحله می‌تواند بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی محصول داشته باشد، درحالی‌که مرحله ابتدایی کمترین حساسیت به آب را دارد و کاهش منابع در آن تأثیر محدودی بر بهره‌وری کلی خواهد داشت (اپریکویک و تزنک، ۲۰۰۴؛ تزنک و هانگ، ۲۰۱۱).



شکل ۵- ارزیابی حساسیت رتبه‌بندی مراحل رشد به تغییرات ضریب وزنی ویکور (v)

Figure 5- Sensitivity analysis of growth stage ranking to changes in the Vikor weighting coefficient (v)

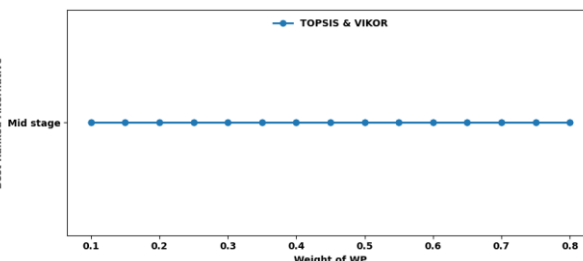
در مرحله میانی رخ می‌دهد و این دوره حساس‌ترین زمان برای تأمین آب است. یافته‌های سلیم و همکاران (۲۰۲۴) در عراق نیز نشان داد که تنش آبی در مراحل گل‌دهی و تشکیل دانه بیشترین تأثیر منفی بر عملکرد دارد، درحالی‌که مرحله بلوغ دانه حساسیت کمتری نسبت به کم‌آبی نشان می‌دهد.

میندوزا و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از مدل اکوآکراپ و پایش دمای سطح برگ دریافتند که مراحل پیش گل‌دهی و گلدهی کینوا بیشترین حساسیت را به تنش آبی دارند و پایش شاخص تنش آبی می‌تواند در زمان‌بندی بهینه

تا ۰/۲، رتبه بهترین گزینه ثابت باقی می‌ماند و مرحله میانی همچنان حساس‌ترین گزینه است. این امر بیانگر پایداری بسیار بالای نتایج نسبت به تغییرات وزن معیارها است.

شکل ۴ نمودار حساسیت وزن‌ها را نشان می‌دهد که خطوط مربوط به حساس‌ترین گزینه در تمام دامنه وزن‌ها یکسان باقی می‌مانند و هیچ نقطه‌ای رتبه تغییر نمی‌کند. پارامتر ضریب وزن (v) در روش Vikor متوازن بین دیدگاه گروهی (جمع معیارها) و دیدگاه فردی (بدترین شاخص) را مشخص می‌کند. با تغییر مقدار v از ۰/۱ تا ۰/۹، حساس‌ترین گزینه همچنان مرحله میانی باقی می‌ماند. این نشان می‌دهد که انتخاب مرحله میانی نسبت به تغییرات روش تصمیم‌گیری Vikor پایدار است و رتبه‌بندی به مقادیر ضریب وزنی v حساس نیست.

شکل ۵ روند تغییر رتبه گزینه‌ها در برابر وزن معیارها را به‌صورت تصویری نشان می‌دهد و نقاط تغییر رتبه و رفتار هر گزینه را مشخص می‌کند.



شکل ۴- ارزیابی حساسیت رتبه‌بندی مراحل رشد به تغییرات وزن معیارها

Figure 4- Evaluation of the sensitivity of growth stage ranking to changes in criteria weights

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که حساسیت کینوا به تنش آبی در مراحل مختلف رشد متفاوت است و مدیریت مناسب در مراحل مختلف رشد نقش کلیدی در حفظ عملکرد و بهبود بهره‌وری منابع دارد. برای نمونه، رزاقی و همکاران (۲۰۲۰) در جنوب ایران گزارش کردند که مدیریت آبیاری در مراحل پر شدن دانه و رسیدگی، تأثیر قابل توجهی بر تثبیت عملکرد دانه و افزایش بهره‌وری آب دارد و کمبود آب در این مرحله منجر به کاهش عملکرد اقتصادی محصول می‌شود. به همین ترتیب، لیو و همکاران (۲۰۲۱) در چین نشان دادند که بیشترین تجمع ماده خشک

آبیاری بسیار مؤثر باشد. همچنین، سلیم و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که کاهش رطوبت خاک تأثیر شدیدتری در مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله رویشی دارد و بیشترین بهره‌وری آب در شرایط رطوبت کافی به دست می‌آید.

علاوه بر این، آوا و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که کم‌آبیاری ملایم بدون کاهش معنادار عملکرد، بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد، درحالی‌که کم‌آبیاری شدید موجب افت چشمگیر عملکرد و کیفیت دانه می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که استراتژی‌های کم‌آبیاری هدفمند در مراحل رشد با حساسیت کمتر، می‌توانند صرفه‌جویی عملی در مصرف آب ایجاد کنند. در همین راستا، پرادهان و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که ترکیب مدیریت آبیاری با در نظر گرفتن حساسیت مراحل رشد و انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب می‌تواند به‌طور قابل توجهی پایداری تولید و کارایی منابع را افزایش دهد و توصیه کردند که برای تصمیم‌گیری در سطح مزرعه از شاخص‌های چندمعیاره شامل عملکرد، بهره‌وری آب و کیفیت دانه استفاده شود.

در مجموع، یافته‌های حاضر و پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که توجه به حساسیت مراحل رشد به آب، به‌کارگیری راهبردهای مناسب تغذیه‌ای و انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم می‌تواند رویکردی مؤثر برای افزایش پایداری تولید کینوا در شرایط کم‌آبی باشد؛ به‌گونه‌ای که ضمن حفظ عملکرد و کیفیت، بهره‌وری آب و سایر نهاده‌های کشاورزی نیز به حداکثر برسد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که حساسیت کینوا به کمبود آب در مراحل مختلف رشد متفاوت است و مرحله میانی رشد به‌عنوان حساس‌ترین مرحله نسبت به مدیریت مصرف آب شناسایی شد. پس از آن، مرحله توسعه در رتبه دوم حساسیت قرار گرفت، درحالی‌که مراحل ابتدایی و

پایانی کمترین تأثیرپذیری را از کمبود آب نشان دادند. این موضوع بیانگر تمرکز اصلی تبخیر-تعرق و تولید زیست‌توده در مراحل میانی رشد است. بر این اساس، مدیریت آبیاری در کشت کینوا در شرایط نیمه‌خشک باید به‌صورت مرحله‌ای و هدفمند انجام شود؛ به‌طوری‌که تأمین آب در مراحل توسعه و به‌ویژه میانی در اولویت قرار گیرد و در مراحل ابتدایی و پایانی امکان اعمال تنش ملایم آبی وجود داشته باشد. چنین رویکردی می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب و پایداری تولید در شرایط محدودیت منابع آبی شود. بااین‌حال، این پژوهش دارای برخی محدودیت‌ها نیز بود. از جمله اینکه مطالعه در یک منطقه اقلیمی مشخص و در بازه زمانی محدود انجام شد، بنابراین تعمیم نتایج به سایر اقلیم‌ها نیازمند احتیاط است. همچنین در این تحقیق تنها شاخص‌های زیست‌توده و بهره‌وری آب به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شد و سایر شاخص‌های فیزیولوژیکی و اقتصادی در تحلیل وارد نشدند. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزیابی حساسیت مراحل رشد کینوا در اقلیم‌های مختلف و در شرایط متنوع مدیریتی آبیاری انجام شود. همچنین استفاده از شاخص‌های تکمیلی مانند کارایی مصرف آب در سطح فیزیولوژیک، عملکرد دانه و کیفیت محصول می‌تواند به درک جامع‌تری از پاسخ گیاه به مدیریت مصرف آب کمک کند. به‌کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی رشد و داده‌های چندساله نیز می‌تواند دقت و قابلیت تعمیم نتایج را افزایش دهد.

تشکر و قدردانی

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

فهرست منابع

۱. متکان، عبدالرضا، درویش‌زاده، رضا، حسینی‌اصل، احمد، ابراهیمی‌خفسی، محمد و ابراهیمی‌خفسی، زهرا، ۱۳۹۱. خشکسالی پهنه‌بندی 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 (۱۳۷۰-۱۳۹۹). تهران، سازمان هواشناسی کشور
3. Aboukhaled, A., Alfaro, J. F., and Smith, M. 1982. *Lysimeters*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 39. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
4. Akram, M. Z., Libutti, A., and Rivelli, A. R. 2024. Drought stress in quinoa: Effects, responsive mechanisms, and management through biochar amended soil: A review. *Agriculture*, 14(8), 1418. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14081418>
5. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
6. Awa, M., Zhao, J., and Tumaerbai, H. 2024. Deficit irrigation-based improvement in growth and yield of quinoa in the northwestern arid region in China. *Sustainability*, 16(10), 4136. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16104136>
7. Bahraseman, S. E., Firoozzare, A., Boccia, F., Pourmohammad, F., and Ameri, A. H. 2025. Determining the best strategies to improve agricultural water productivity in arid and semi-arid regions: An ordinal priority approach. *Journal of Arid Environments*, 231, 105458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105458>
8. Bazile, D., Jacobsen, S.-E., and Verniau, A. 2016. The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Frontiers in Plant Science*, 7, 622. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
9. Biswas, T., Sah, R. P., Kumar, R., Kumar, V., and Nath, C. P. 2024. Evaluation of management practices in rice–wheat cropping system using multicriteria decision-making methods in conservation agriculture. *Scientific Reports*, 14, 8600. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58022-w>
10. Borg, H., and Grimes, D. W. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Transactions of the ASAE*, 29(1), 194–197. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.30125>
11. FAOSTAT. 2025. *Quinoa production statistics (2010–2023)*. <https://faostat.fao.org>
12. Gámez, A. L., Soba, D., Zamarreño, Á. M., García-Mina, J. M., Aranjuelo, I., and Morales, F. 2019. Effect of water stress during grain filling on yield, quality and physiological traits of Illpa and Rainbow quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Plants*, 8(6), 173. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8060173>
13. Garcia, M., Raes, D., and Jacobsen, S.-E. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Agricultural Water Management*, 60(2), 119–134. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00162-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00162-2)
14. Geerts, S., and Raes, D. 2008. Crop water use indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research*, 108(2), 150–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.04.008>
15. Geerts, S., Jacobsen, S.-E., and Raes, D. 2008. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 95(6), 1525–1539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.009>
16. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., and Steduto, P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101(3), 499–508. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0137s>

17. Gómez, J., García-Parra, L. A., Roa-Acosta, D., and Bravo-Gómez, J. E. 2022. Growth and water use efficiency of quinoa in Colombia: Stage-specific irrigation management. *Agricultural Water Management*, 263, 107488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107488>
18. Hinojosa, L., Kumar, N., Gill, K. S., and Murphy, K. M. 2019. Spectral reflectance indices and physiological parameters in quinoa under contrasting irrigation regimes. *Crop Science*, 59(5), 1927–1944. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.11.0711>
19. Howell, T. A., Schneider, A. D., and 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). ASAE.
20. IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
21. Li, H., Wang, Y., Zhang, X., Zhang, J., and Liu, X. 2023. Water use efficiency of quinoa during flowering and grain filling under deficit irrigation in China. *Agronomy*, 13(2), 390. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020390>
22. Liu, F., Song, C., and Feng, Z. 2021. Growth, biomass accumulation and water use efficiency of quinoa under different irrigation regimes in Northwest China. *Grassland Science*, 67(3), 207–216. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12307>
23. Mardani, A., Jusoh, A., Md Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., and Valipour, A. 2015. Multiple criteria decision-making techniques and their applications – A review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
24. Mendoza-Márquez, B., Chuchon-Rejon, R., Ramos-Fernández, L., Falconí-Palomino, J., Garcia-Lopez, Y., and Gómez-Pando, L. 2026. Water stress thresholds and irrigation management via infrared thermography and AquaCrop model in quinoa cultivation in arid zones. *Agricultural Research*, 15, 1038–1048. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40003-025-00869-0>
25. Mirsafi, S. M., Sepaskhah, A. R., and Ahmadi, S. H. 2024. Physiological traits, crop growth, and grain quality of quinoa in response to deficit irrigation and planting methods. *BMC Plant Biology*, 24, 809. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05523-5>
26. Opricovic, S., and Tzeng, G. H. 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445–455.
27. Oustani, M., Mehda, S., Halilat, M. T., et al. 2023. Yield, growth development and grain characteristics of seven quinoa genotypes grown under hot-arid conditions. *Scientific Reports*, 13, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28974-4>
28. Pereira, L. S., Paredes, P., Hunsaker, D. J., López-Urrea, R., and Jovanovic, N. 2021. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, 248, 106697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106697>
29. Pradhan, A., Rane, J., Basavaraj, P. S., Kumar, N., Shid, D., Paul, N. C., Pal, K. K., and Reddy, K. S. 2025. Optimizing crop management strategies for improved yield, water productivity, and sustainability of quinoa in shallow basaltic semi-arid regions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1522995. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1522995>
30. Qureshi, M. R. N., Singh, R. K., and Hasan, M. A. 2018. Decision support model to select crop pattern for sustainable agricultural practices using fuzzy MCDM. *Environment, Development and Sustainability*, 20(2), 641–659. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9903-7>
31. Razzaghi, F., Bahadori-Ghasroldashti, M. R., Henriksen, S., Sepaskhah, A. R., and Jacobsen, S.-E. 2020. Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to deficit irrigation imposed at different growing stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(3), 390–404. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12392>
32. Salim, S. A. A. R., Al-Hadithi, I. K. H., and Al-Hadithi, A. G. M. 2022. Effect of water stress at different growth stages on yield and its components of quinoa. *The Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 53(6), 1241–1251.

33. Salim, S. A., Rasheed, F. T., Al-Deen, U. H., and Muneem, R. A. A. 2024. Water requirements, soil moisture availability, and their effects on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) development and yield. *Asian Journal of Science and Applied Technology*, 13(2), 25–33. DOI: <https://doi.org/10.70112/ajsat-2024.13.2.4250>
34. Tuncel, G., and Gunturk, B. 2024. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for agricultural land selection. *Sustainability*, 16(23), 10509. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162310509>
35. Tzeng, G. H., and Huang, J. J. 2011. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.
36. Velasquez, M., and Hester, P. T. 2013. An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), 56–66.
37. Vilcacundo, R., and Hernández-Ledesma, B. 2017. Nutritional and biological value of quinoa. *Current Opinion in Food Science*, 14, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.11.007>