

مدیریت پایدار آبیاری با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره: مطالعه موردی در کشت کینوا

رضا محمدی کیا

محقق، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: rmswri@gmail.com

چکیده

در این پژوهش با هدف شناسایی مرحله رشد بهینه کینوا برای مدیریت پایدار منابع آب در شرایط نیمه‌خشک کرج، سه شاخص کلیدی زیست‌توده، تبخیر-تعرق (ETc) و ضریب گیاهی (Kc) در چهار مرحله رشد (ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) اندازه‌گیری و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی شدند. داده‌ها بر اساس نتایج دو سال تحقیقات لایسمتری و محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به روش پنمن-مانتیث تحلیل شدند. نتایج نشان داد مرحله میانی با داشتن بیشترین مقدار ضریب گیاهی، بالاترین نیاز آبی و سهم قابل توجه در تجمع زیست‌توده، در ترکیب وزن‌دهی برابر به معیارها، بهترین رتبه را کسب کرد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه‌بندی مراحل رشد کینوا نسبت به تغییر وزن معیارها پایدار است. در تمامی ترکیب‌های وزنی مدیریتی، تحلیل حساسیت تک‌متغیره ($\pm 20\%$) و تحلیل حساسیت چندمتغیره به روش مونت کارلو، مرحله میانی همواره رتبه نخست را حفظ کرد و به‌عنوان پایدارترین گزینه در فرآیند تصمیم‌گیری شناسایی شد، در حالی که مراحل ابتدایی و پایانی در تمامی سناریوها عملکرد ضعیفی از خود نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که مدیریت منابع آب باید بر مرحله میانی متمرکز شود تا بهره‌وری آب و عملکرد محصول به حداکثر برسد. یافته‌های این مطالعه چارچوبی کاربردی برای برنامه‌ریزی آبیاری و تخصیص بهینه منابع آب در کشت کینوا ارائه می‌کند.

واژگان کلیدی: تبخیر-تعرق، روش مونت کارلو، ضریب گیاهی، کارایی مصرف آب، مدیریت آبیاری

۱. مقدمه

کینوا (*Chenopodium quinoa Willd.*) به‌عنوان یک گیاه دانه‌ای مقاوم به تنش‌های محیطی، در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار و امنیت غذایی جهان دارد. این گیاه، بومی رشته‌کوه‌های آند در آمریکای جنوبی است و توانایی رشد در شرایط نامساعد همچون خشکی، شوری و خاک‌های فقیر از نظر مواد غذایی را دارد (Jacobsen et al. 2003). ارزش غذایی بالای کینوا، شامل پروتئین کامل با اسیدهای آمینه ضروری، فیبر و مواد معدنی، سبب شده است که سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) آن را به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک برای مقابله با ناامنی غذایی معرفی کند (Bazile et al. 2016). روند رو به رشد کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نشان‌دهنده اهمیت آن در آینده کشاورزی است، به‌گونه‌ای که تولید جهانی کینوا از حدود ۸۰ هزار تن در سال ۲۰۰۰ به بیش از ۲۰۰ هزار تن در سال ۲۰۲۰ رسیده است (FAO, 2021).

بحران جهانی آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت مدیریت دقیق منابع آب در کشاورزی را بیش از پیش آشکار کرده است. در ایران، کاهش بارندگی، افزایش تبخیر و فشار روزافزون بر منابع آب زیرزمینی موجب شده است که بهره‌برداری پایدار از منابع آب یکی از اولویت‌های اصلی بخش کشاورزی باشد (FAO, 2020). کینوا به‌عنوان یک محصول مقاوم به تنش می‌تواند نقش مهمی در تنوع‌بخشی به الگوی کشت و ارتقای امنیت غذایی کشور ایفا کند، اما موفقیت آن وابسته به مدیریت علمی آبیاری و شناخت دقیق نیازهای آبی در مراحل مختلف رشد است.

شاخص‌هایی مانند تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) و ضریب گیاهی (K_c) ابزارهای کلیدی در برنامه‌ریزی آبیاری محسوب می‌شوند. این شاخص‌ها نه تنها بیانگر وضعیت فیزیولوژیک و فتوسنتزی گیاه هستند، بلکه امکان برآورد دقیق نیاز آبی و کارایی مصرف آب را نیز فراهم می‌کنند (Allen et al. 1998). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مقادیر K_c و ET_c در طول دوره رشد گیاه تغییرات چشمگیری دارند و همین امر ضرورت بررسی این شاخص‌ها در مراحل مختلف رشد را برجسته می‌سازد (Geerts et al., 2008; Garcia et al., 2003). در عین حال، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده یا بر مدیریت کلی رژیم‌های آبیاری تمرکز داشته‌اند یا تنها یک معیار خاص (مانند عملکرد یا کارایی مصرف آب) را بررسی کرده‌اند، در حالی که ترکیب همزمان چند معیار می‌تواند تصویر جامع‌تری از وضعیت گیاه ارائه دهد.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در مدیریت منابع آب و کشاورزی به کار رفته‌اند. در میان آن‌ها، روش VIKOR به دلیل قابلیت ارائه راه‌حل مصالحه‌ای میان معیارهای متضاد، توجه ویژه‌ای یافته است (Opricovic & Tzeng, 2004). مطالعاتی نظیر Halder et al. (2025) و Jia & Zhang (2024) نشان داده‌اند که VIKOR می‌تواند برای ارزیابی پایداری منابع آب و تحلیل تغییرات مصرف آب در مقیاس منطقه‌ای بسیار مؤثر باشد. در مطالعه‌ای دیگر، Topno (2022) با استفاده از رویکرد یکپارچه AHP-VIKOR، زیرحوضه‌های آسیب‌پذیر را شناسایی و اولویت‌بندی کرد و بر ضرورت اقدامات فوری در مدیریت منابع آب-خاک تأکید نمود. با این حال، اغلب این پژوهش‌ها در سطح کلان (حوضه آبریز، منطقه یا پروژه‌های بزرگ آبیاری) اجرا شده و کاربرد این روش در سطح مزرعه، به‌ویژه برای تعیین مرحله رشد بهینه یک محصول به‌منظور مدیریت منابع آب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این راستا، پژوهش حاضر با رویکردی نوآورانه به‌دنبال توسعه یک چارچوب تصمیم‌گیری علمی برای مدیریت بهینه منابع در کشت کینوا است. در این مطالعه، سه معیار کلیدی زیست‌توده، ضریب گیاهی (K_c) و تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) به‌صورت همزمان در فرآیند تصمیم‌گیری تلفیق شده‌اند تا مرحله رشد بهینه کینوا شناسایی شود. افزون بر این، تحلیل حساسیت وزن معیارها به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج و ارائه گزینه‌های مدیریتی متناسب با اهداف متفاوت، از جمله افزایش عملکرد اقتصادی یا بهبود کارایی

مصرف آب، انجام شده است. در مجموع، هدف اصلی این تحقیق شناسایی مرحله رشد بهینه کینوا در شرایط نیمه خشک منطقه کرج با بهره‌گیری از روش VIKOR بود تا مبنایی کاربردی و قابل اتکا برای مدیریت پایدار منابع آب و تولید در نظام‌های زراعی فراهم شود.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. محل و شرایط اجرای پژوهش

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب واقع در مشکین‌دشت کرج با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۲۱ متر از سطح دریا انجام شد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه از نوع گرم و خشک گزارش شده است (Matkan et al., 2012). بر اساس گزارش‌های اقلیمی دوره ۲۰۲۱-۱۹۹۲ در منطقه کرج، دمای بیشینه حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه حدود یک درجه سانتی‌گراد بوده است (IMO, 2021).

۲.۲. خصوصیات خاک و آب

نتایج آزمون خاک (جدول ۱) نشان داد که مزرعه دارای بافت خاک لوم با ترکیبی متعادل از شن، سیلت و رس است، بنابراین زهکشی و نگهداری رطوبت مناسبی برای رشد کینوا فراهم می‌کند. مقادیر پایین شوری و قلیابیت خاک نشان‌دهنده محیطی مساعد برای جذب عناصر غذایی و کاهش تنش شوری برای گیاه بود. آب آبیاری با اسیدیتته ۷/۵، هدایت الکتریکی ۰/۵۶ دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم ۰/۳۵، خطر تجمع نمک در ناحیه ریشه را کاهش داده و شرایط ایده‌آل برای آزمایش تبخیر-تعرق با لایسیمتر را فراهم نمود. این ویژگی‌ها تضمین می‌کنند که داده‌های تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی ثبت‌شده، نماینده شرایط واقعی مزرعه و قابل استفاده در مدیریت آبیاری باشند.

Table 1. Soil characteristics of the experimental farm

Soil depth (cm)	Soil texture	Bd (g cm ⁻³)	EC (dS m ⁻¹)	pH	OC (%)	PWP	FC
0-30	Loam	1.52	0.72	7.7	0.55	9.5	19.2
30-60	Loam	1.58	0.58	7.8	0.41	8.5	18.8

۳.۲. عملیات زراعی

عملیات خاک‌ورزی، کوددهی و آماده‌سازی مزرعه بر اساس نتایج آزمون خاک و مطابق با توصیه‌های کارشناسی انجام گرفت. پس از آماده‌سازی زمین، بذرها به صورت متراکم کشت شدند و پس از مرحله جوانه‌زنی، عملیات تنک‌کردن انجام شد به گونه‌ای که فاصله نهایی بین گیاهان در محدوده ۲۵ تا ۳۵ سانتی‌متر تنظیم گردید. کودهای پایه شامل فسفر و پتاسیم به میزان توصیه‌شده بر اساس آزمون خاک و قبل از کاشت به خاک افزوده شد و کود ازته به صورت سرک در مراحل حساس رشد گیاه اعمال گردید. آبیاری مزرعه به صورت منظم و بر اساس برنامه تعریف‌شده انجام شد تا تنش آبی به حداقل برسد. عملیات کنترل علف‌های هرز، مبارزه با آفات و بیماری‌ها طبق دستورالعمل‌های فنی صورت گرفت تا رشد مطلوب گیاه فراهم گردد. برداشت محصول در زمان رسیدگی کامل انجام شد و سپس برای مراحل بعدی آزمایش‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آماده‌سازی گردید. شکل یک تصاویر مزرعه کینوا را نشان می‌دهد.



Figure 1. Images of the quinoa experimental farm

۴.۲. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه (ET_c)

در این پژوهش، داده‌های مربوط به تبخیر-تعرق واقعی گیاه (ET_c)، ضریب گیاهی و زیست‌توده کینوا در چهار مرحله رشد شامل مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی جمع‌آوری شد. آزمایش طی دو سال زراعی با استفاده از دو دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار انجام شد. ابعاد لایسیمترها 1×2 متر و عمق آن‌ها $1/2$ متر بود که امکان اندازه‌گیری دقیق مؤلفه‌های بیلان آب را فراهم می‌کرد. تاریخ کشت به ترتیب ۱۲ مرداد و ۲۵ تیرماه سال‌های زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ بود. برای کاهش تأثیر محیط اطراف، 400 برابر سطح هر لایسیمتر به‌عنوان کشت حاشیه‌ای در نظر گرفته شد. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و مطالعات انجام‌شده توسط Aboukhaled و همکاران (۱۹۸۲)، برای کاهش تأثیر شرایط محیطی اطراف لایسیمتر، به‌ویژه در مناطق خشک، در نظر گرفتن ناحیه‌ای با وسعتی حدود 400 برابر سطح لایسیمتر به‌عنوان بافر مناسب توصیه شده است (Aboukhaled et al., 1982; Shukla et al., 2014).

تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) با استفاده از لایسیمتر تحت شرایط عدم محدودیت آب اندازه‌گیری شد. در این روش، رطوبت خاک لایسیمتر در نزدیکی ظرفیت زراعی نگه داشته شد تا مقدار ET_c بیانگر نیاز آبی پتانسیل گیاه باشد. آبیاری زمانی انجام شد که رطوبت حجمی خاک در عمق‌های $30-60$ و $0-30$ سانتی‌متر به حدود 80% ظرفیت زراعی کاهش یافت. با توجه به بافت خاک سبک، دوره آبیاری بین ۲ تا ۳ روز متغیر بود. این سطح رطوبت بر اساس نتایج مطالعات مشابه لایسیمتری انتخاب شد (Allen et al., 1998; Howell et al., 1991; Howell et al., 2004).

حجم آب مصرفی در هر نوبت با استفاده از کنتور حجمی اندازه‌گیری و ثبت شد تا از یکنواختی آبیاری اطمینان حاصل شود. کل مزرعه آزمایشی بر اساس مقادیر تبخیر-تعرق (ET_c) اندازه‌گیری‌شده در لایسیمتر مدیریت شد تا شرایط آبیاری واقعی مزرعه با داده‌های لایسیمتری سازگار باشد.

رطوبت خاک در طول فصل رشد در فواصل منظم و با استفاده از دستگاه TDR (Time Domain Reflectometry) در عمق‌های $0-30$ و $30-60$ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها در هر مرحله رشد و قبل و بعد از هر آبیاری انجام گرفت تا تغییرات ذخیره رطوبت خاک و نفوذ عمقی آب به‌دقت تعیین شود.

با توجه به این‌که عمق لایسیمتر ($1/2$ متر) بیشتر از عمق توسعه ریشه گیاه (70 سانتی‌متر) بود، برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه از معادله بیلان آب به صورت زیر استفاده شد:

$$ET_c = I + P - R \pm \Delta S - D - L \quad (1)$$

در این رابطه، I نشان‌دهنده آب آبیاری، P بارش، R رواناب سطحی که در این آزمایش وجود نداشت، ΔS تغییرات ذخیره رطوبت خاک، D نفوذ عمقی در ناحیه ریشه و L آب زهکشی شده از کف لایسیمتر بود. بنابراین برای محاسبه دقیق تبخیر-تعرق گیاه، هر دو پارامتر نفوذ عمقی و آب زهکشی شده لحاظ شدند تا بیلان دقیق آب گیاه در ناحیه ریشه به دست آید.

۵.۲. تبخیر-تعرق مرجع (ET_0)

تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) شاخصی اساسی برای برآورد نیاز آبی گیاهان تحت شرایط استاندارد اقلیمی محسوب می‌شود و مبنای اصلی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه آبیاری است. در این مطالعه، مقدار تبخیر-تعرق مرجع با بهره‌گیری از معادله پنمن-مونتیت فائو (Penman-Monteith FAO) محاسبه گردید که به‌عنوان دقیق‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش شناخته می‌شود. این روش با در نظر گرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های انرژی (مانند تابش و دما) و عوامل آیرودینامیکی (نظیر باد و رطوبت) امکان برآورد دقیق تبخیر-تعرق مرجع را فراهم می‌آورد و در نتیجه، نقش بسزایی در بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در کشت‌هایی همچون کینوا ایفا می‌کند. فرمول محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

در این رابطه:

ET_0 : تبخیر-تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)

R_n : تشعشع خالص در سطح گیاه ($MJ/m^2/day$)

G: شار گرمایی خاک ($MJ/m^2/day$)

T: دمای متوسط هوا در ارتفاع دو متر ($^{\circ}C$)

u_2 : سرعت باد در ارتفاع دو متر (m/s)

$e_s - e_a$: کسری فشار بخار یا کمبود رطوبتی هوا (kPa)

Δ : شیب منحنی فشار بخار-دما ($kPa/^{\circ}C$)

γ : ضریب سایکرومتری ($kPa/^{\circ}C$)

داده‌های ورودی موردنیاز شامل اطلاعات روزانه هواشناسی نظیر دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی طی سال‌های اجرای این پژوهش از ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت کرج اخذ گردید.

۶.۲. ضریب گیاهی (K_c)

ضریب گیاهی نشان‌دهنده فعالیت فتوسنتزی و پوشش گیاهی در هر مرحله رشد است و برای مدیریت آبیاری کاربرد دارد. این ضریب منعکس‌کننده ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، پوشش سطح زمین، رشد برگ و مرحله رشد گیاه است. به طور معمول، ضریب گیاهی در طول فصل رشد تغییر می‌کند و برای هر مرحله رشد گیاه (جوانه‌زنی، رشد اولیه، رشد کامل و رسیدگی) مقدار متفاوتی دارد. برای مثال، در مرحله جوانه‌زنی ضریب گیاهی کمتر است چون سطح برگ کم است و تبخیر-تعرق گیاه پایین است، اما در مرحله رشد کامل با پوشش برگ گسترده، ضریب گیاهی به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

ضریب گیاهی برای دوره‌های ده‌روزه از نسبت E_{Tc} به E_{T0} محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$K_c = \frac{E_{Tc}}{E_{T0}} \quad (3)$$

در این رابطه:

K_c : ضریب گیاهی

E_{Tc} : تبخیر-تعرق گیاهی (mm/d)

E_{T0} : تبخیر-تعرق گیاه مرجع (mm/d)

۷.۲. آنالیز آماری و تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

به دلیل محدودیت تعداد تکرارهای آزمایشی (دو دستگاه لایسیمتر در هر سال و دو سال مطالعه)، قدرت آماری مدل‌های پیچیده محدود بود. بنابراین، تمرکز بر تحلیل توصیفی داده‌ها شامل میانگین و انحراف معیار تبخیر-تعرق، ضریب گیاهی و زیست‌توده مراحل مختلف رشد و رتبه‌بندی مراحل رشد با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR بود. این رویکرد امکان شناسایی مرحله رشد بهینه برای مدیریت منابع را فراهم می‌کند و با ارائه شاخص ویکور (Q) و نمودارهای حساسیت، اطلاعات عملی و علمی ارزشمندی برای برنامه‌ریزی آبیاری فراهم می‌نماید.

استفاده از تحلیل چندمعیاره در شرایط داده‌های محدود، روشی معتبر برای استخراج نتایج کاربردی و هدایت تصمیم‌گیری مزرعه‌ای محسوب می‌شود (Opricovic & Tzeng, 2004). این رویکرد به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با وجود محدودیت در دسترسی به داده‌های دقیق، بتوانند معیارهای مختلف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی را در کنار هم مورد توجه قرار دهند و گزینه‌های بهینه را شناسایی کنند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، حتی در شرایط وجود عدم قطعیت یا اطلاعات ناقص، ابزار قدرتمندی برای انتخاب الگوی کشت، مدیریت منابع آب و زمین و بهینه‌سازی نهاده‌های کشاورزی هستند (Qureshi et al., 2018; Biswas et al., 2024; Tuncel & Gunturk, 2024). بر همین اساس، بهره‌گیری از تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند نقش مهمی در ارتقای پایداری سیستم‌های کشاورزی و حمایت از تصمیم‌گیری در محیط‌های واقعی ایفا نماید (Bahraseman et al. 2025).

۸.۲. تئوری تصمیم‌گیری چندمعیاره

برای تعیین مرحله بهینه رشد از نظر تعادل بخشی بین تولید زیست‌توده، مصرف آب و فعالیت فتوسنتزی، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR استفاده شد. این روش یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) است که برای رتبه‌بندی گزینه‌ها در مسائل چندمعیاره با معیارهای متضاد کاربرد دارد (Opricovic, 1998). هدف این روش یافتن راه‌حل میانجی است که عملکرد نسبی خوبی در تمام معیارها داشته باشد و گزینه‌ای نزدیک به بهینه ارائه دهد.

به منظور شناسایی مرحله رشد بهینه‌ای که بتواند حداکثر تولید زیست‌توده با حداقل مصرف آب و شرایط رشد مناسب را فراهم کند، چهار مرحله رشد کینوا (ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی) به‌عنوان گزینه‌ها (Alternatives) و داده‌های زیست‌توده (kg/ha)، تبخیر-تعرق (mm) و ضریب گیاهی هر مرحله رشد به‌عنوان معیارهای ماتریس تصمیم‌گیری روش تحلیل چندمعیاره در نظر گرفته شدند. به منظور یکپارچگی و مقایسه صحیح، مقادیر هر معیار برای هر مرحله رشد، از میانگین نتایج دو سال مطالعه محاسبه شد. زیست‌توده و ضریب گیاهی به‌عنوان معیارهای مثبت (هرچه بیشتر بهتر) و تبخیر-تعرق به‌عنوان معیار منفی (هرچه کمتر بهتر) تعریف شدند. برای ارزیابی و رتبه‌بندی مراحل رشد کینوا روش VIKOR در چندین گام اجرا شد. ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری شامل مقادیر میانگین هر معیار برای چهار مرحله رشد ساخته شد. سپس بهترین و بدترین مقادیر هر معیار مشخص گردید؛ به طوری که بیشینه مقادیر برای معیارهای مثبت و کمینه مقادیر برای معیارهای منفی به‌عنوان بهترین مقدار و بالعکس به‌عنوان بدترین مقدار در نظر گرفته شدند.

در مرحله بعد، فاصله‌های نسبی هر مرحله از بهترین مقادیر معیارها با وزندهی مناسب محاسبه شد و شاخص نهایی ویکور (Q) با استفاده از رابطه استاندارد و با در نظر گرفتن ضریب وزن برای تعادل میان شاخص‌ها S (میانگین فاصله‌ها) و R (حداکثر فاصله) تعیین گردید. سپس مراحل رشد بر اساس مقدار شاخص نهایی ویکور رتبه‌بندی شدند، به طوری که عدد صفر نمایانگر گزینه کاملاً بهینه و عدد یک نشان‌دهنده گزینه با کمترین مطلوبیت بود.

علاوه بر این، برای بررسی حساسیت رتبه‌بندی نسبت به اهمیت نسبی معیارها، ترکیب‌های مختلف وزندهی و روش‌های تحلیل حساسیت تک‌متغیره و چندمتغیره اجرا شد. تمام محاسبات و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Python (نسخه ۳.۱۱) و کتابخانه‌های pandas و NumPy انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تبخیر-تعرق و برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده گیاه کینوا

میانگین دوره رشد کینوا در کرج طی سال‌های اجرای پژوهش ۹۰ روز و مقدار تبخیر-تعرق آن برای کل دوره رشد ۴۱۳/۵ میلی‌متر و وزن زیست‌توده تولیدی اندام هوایی گیاه ۶۸۱۶ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد. تبخیر-تعرق گیاه مرجع متناظر با دوره رشد کینوا ۵۸۶/۵ میلی‌متر بود. در هر سال، طول مراحل رشد گیاه بر اساس خصوصیات فنولوژیکی گیاه توسط کارشناسان مؤسسه تحقیقات اصلاح و بذور 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) ۲۵ روز و مرحله پایانی (از تغییر رنگ تا برداشت محصول) ۱۵ روز بود.

میانگین و انحراف معیار زیست‌توده، تبخیر-تعرق (ET_c) و ضریب گیاهی (K_c) مراحل مختلف رشد کینوا (میانگین دو سال) در جدول ۲ ارائه شده است.

Table 2. Mean \pm SD of ET_c, K_c, and biomass across quinoa growth stages

Growth stage	Biomass (kg/ha)	Cumulative biomass (kg/ha)	ET _c (mm)	Crop coefficient (K _c)
Initial	396 \pm 18	396	61.85 \pm 3.6	0.41 \pm 0.01
Development	1973 \pm 53	2369	133.3 \pm 10.0	0.59 \pm 0.02
Mid-season	3936 \pm 31	6305	193.9 \pm 13.3	1.05 \pm 0.10
Late-season	511 \pm 24	6816	24.1 \pm 0.99	0.74 \pm 0.02

داده‌های این جدول نشان می‌دهد که وزن زیست‌توده کینوا از 18 ± 396 کیلوگرم در هکتار در مرحله اولیه به 239 ± 6816 کیلوگرم در مرحله پایانی افزایش یافته است 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 S شکل بود؛ به‌طوری که پس از رشد کند اولیه، سرعت افزایش زیست‌توده از مرحله توسعه به بعد به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در مراحل میانی و پایانی به حالت تقریباً پایدار رسید. این الگو نشان می‌دهد که دوره رشد میانی و پایانی، مهم‌ترین مراحل برای تجمع ماده خشک و بهبود عملکرد نهایی محصول هستند.

یافته‌های حاضر با مطالعات اخیر در ایران و سایر کشورها همخوانی دارد؛ به عنوان مثال، MirSafi و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که بیشترین تجمع ماده خشک در بازه مراحل توسعه تا میانی رخ می‌دهد و مدیریت آبیاری باید در این بازه زمانی متمرکز گردد.

تبخیر-تعرق از $3/6 \pm 61/85$ میلی‌متر در مرحله اولیه 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. ضریب گیاهی از $0/1 \pm 0/41$ در مرحله اولیه به اوج $0/1 \pm 1/05$ در مرحله میانی رسید و در مرحله پایانی به $0/2 \pm 0/74$ کاهش یافت.

این روند مطابق با یافته‌های پیشین نشان می‌دهد که نیاز آبی کینوا در طول مراحل توسعه و میانی به حداکثر می‌رسد (Abu Al- (Harti et al., 2023; Jokarfard et al., 2024).

عملکرد دانه و وزن هزار دانه در سال‌های اول و دوم به ترتیب 3257 و 3465 کیلوگرم در هکتار و $2/74$ و $2/97$ گرم بود که بیانگر افزایش قابل توجه عملکرد در سال دوم بود.

این نتایج با گزارش‌های جهانی و مطالعات اخیر (Sanandaji et al., 2024 and Jokarfard et al., 2024) همخوانی دارد و نشان می‌دهد رقم تی‌تی‌کاکا در شرایط نیمه‌خشک کرج پتانسیل بالایی برای تولید دارد.

مقادیر کارایی مصرف آب کینوا ($0/77$ و $0/86$ کیلوگرم بر مترمکعب) در محدوده قابل قبول قرار دارند و نشان‌دهنده سازگاری مطلوب گیاه با شرایط محدودیت آبی است.

یافته‌ها حاکی از آن هستند که مدیریت بهینه آب در طول دوره رشد می‌تواند نقش مهمی در افزایش بهره‌وری و کارایی مصرف آب داشته باشد. با این حال، مدیریت منابع آب در مرحله میانی رشد اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در این مرحله شکل‌گیری اندام‌های زایشی و پر شدن دانه‌ها کامل می‌شود و توانایی گیاه برای جبران تنش آبی کاهش می‌یابد. بنابراین تأمین مناسب آب در این دوره، موجب حفظ عملکرد نهایی محصول و تثبیت کارایی مصرف آب می‌شود.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که کینوا یک محصول مقاوم با کارایی بالای مصرف آب است و برای کشت در مناطق کم‌آب و نیمه‌خشک مناسب می‌باشد (Jacobsen, 2003; Vega-Gálvez et al., 2010; Rojas et al., 2015).

۲.۳. شناسایی مرحله بهینه رشد برای مدیریت پایدار منابع آب

۱.۲.۳. رتبه‌بندی مراحل رشد کینوا با وزن‌های برابر معیارها

نتایج محاسبات روش چندمعیاره VIKOR نشان دادند که مرحله میانی با کمترین مقدار شاخص ویکور بهترین عملکرد را دارد؛ این مرحله علاوه بر کم بودن فاصله مجموع از بهترین معیارها (S)، دارای پشیمانی نسبتاً پایین در بدترین معیار (R) نیز است، که نشان می‌دهد عملکرد آن متوازن و کم‌ریسک است. مرحله توسعه با کمترین مقدار R در بین گزینه‌ها، رتبه دوم را به دست آورد، که نشان‌دهنده توانایی این مرحله در دستیابی به عملکرد مطلوب با حداقل پشیمانی در بدترین معیار است.

مرحله پایانی در رتبه سوم قرار گرفت و مرحله ابتدایی ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد، چرا که دارای بیشترین S و Q بود و از نظر فاصله از بهترین مقادیر معیارها و بیشترین پشیمانی در یک یا چند معیار کمترین کارایی را داشت. 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 موثری برای تصمیم‌گیری پژوهشی و عملیاتی در شناسایی مرحله رشد بهینه برای مدیریت زراعی محصولات کشاورزی فراهم آورد. شاخص‌های S، R و Q، به شرح جدول (۳) و رتبه‌بندی مراحل رشد در شکل (۲) ارائه شده است.

Table 3. Ranking of quinoa growth stages with equal criteria weights based

Stage	S (Weighted sum)	R (Weighted max)	Q (VIKOR)	Rank
Initial	0.9259	0.3333	1.0000	4
Development	0.5434	0.2396	0.6528	2
Middle	0.0000	0.0000	0.0000	1
Final	0.8173	0.3333	0.9414	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

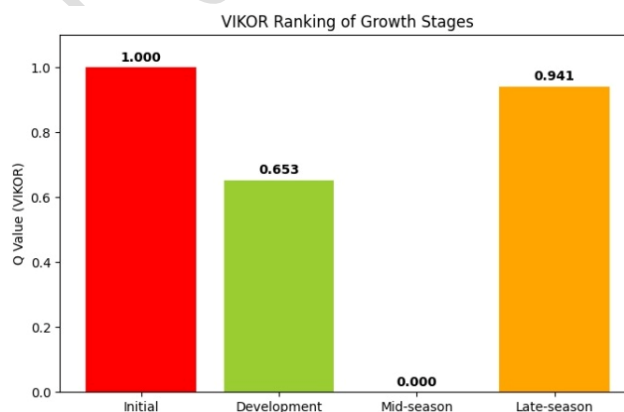


Figure 2. Ranking chart of different quinoa growth stages with equal criteria weights

این نتایج با یافته‌های مطالعات مشابه در داخل و خارج کشور همخوانی دارد. برای مثال، MirSafi et al (2024) گزارش کردند که بیشترین تجمع ماده خشک در مراحل توسعه تا میانی رخ می‌دهد و مدیریت منابع باید در این بازه زمانی متمرکز شود. همچنین، Ahmadi et al. (2025) حساسیت رشد کینوا به مدیریت آبیاری در مراحل میانی را تأیید کرده‌اند. در چین گزارش شده، کارایی مصرف آب (WUE) در مرحله گلدهی تا رسیدگی دانه بیشترین مقدار است و مدیریت آبیاری در این مرحله اهمیت

بالایی دارد (Li et al., 2023). در کلمبیا، بیشترین تجمع ماده خشک در مراحل توسعه تا میانی مشاهده شد و الگوی رشد گیاه با مدل‌های سیگموئیدال (زنگوله‌ای) تطابق داشت (Gómez et al., 2022).

بنابراین، نتایج حاضر و مطالعات پیشین نشان می‌دهند که مرحله میانی بهترین مرحله از نظر تعادل بخشی بین تولید زیست‌توده و مصرف آب است و تمرکز بر مدیریت منابع آب در این مرحله می‌تواند کلید دستیابی به عملکرد پایدار و کارآمد در تولید کینوا باشد.

۲.۲.۳. تحلیل پایداری

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 آنجا که 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. به عبارت دیگر، طراحی ترکیب‌های مختلف وزنی این امکان را فراهم می‌کند که مدیریت مزرعه در شرایط متنوع (مانند تأکید بر عملکرد اقتصادی، کارایی مصرف آب یا تجمع زیست‌توده) شبیه‌سازی شود و تصمیم‌گیری‌ها متناسب با اهداف متفاوت تولیدکنندگان و محققان صورت گیرد. بنابراین، در این پژوهش سه ترکیب وزنی دیگر بر اساس تغییر وزن معیارها تعریف شد و با استفاده از روش VIKOR رتبه‌بندی مراحل چهارگانه رشد کینوا انجام گردید.

۱.۲.۲.۳. تحلیل پایداری به روش تغییر وزن معیارها با رویکرد مدیریتی

در ارزیابی پایداری نتایج، سه ترکیب وزنی با هدف بررسی تأثیر اولویت‌های مدیریتی برای تعیین بهترین مرحله رشد محصول برای مدیریت بهینه منابع آب تعریف شدند.

در ترکیب نخست که وزن معیار زیست‌توده برابر $0/6$ و وزن دو معیار تبخیر-تعرق و ضریب گیاهی هر کدام $0/2$ لحاظ شد، مرحله میانی به‌عنوان گزینه برتر شناسایی شد. این نتیجه نشان می‌دهد که هنگامی که هدف اصلی حداکثرسازی تولید زیست‌توده باشد، مرحله میانی بهترین عملکرد نسبی را دارد. با این حال، غلبه معیار زیست‌توده بر دو معیار آبی می‌تواند با افزایش برداشت منابع و فشار بر سیستم‌های تولیدی همراه باشد و از این رو، تطابق کامل با اصول پایداری ندارد.

در ترکیب دوم که وزن معیار تبخیر-تعرق برابر $0/6$ و وزن دو معیار دیگر هر کدام $0/2$ تنظیم شد، مرحله میانی پایین‌ترین مقدار Q و در نتیجه رتبه نخست را کسب کرد. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که با افزایش اهمیت معیارهای مرتبط با کارایی مصرف آب، مرحله میانی عملکرد بسیار بهتری ارائه می‌دهد. در واقع، افزایش وزن تبخیر-تعرق (ETc) باعث شده است که مراحل رشد از منظر سازگاری با محدودیت منابع آب بازتنظیم شوند که یکی از ارکان بنیادی کشاورزی پایدار است.

به‌طور مشابه، در ترکیب سوم که معیار ضریب گیاهی با وزن $0/6$ و دو معیار دیگر هر کدام با وزن $0/2$ مدل‌سازی شدند، مرحله میانی بار دیگر بهترین رتبه را به دست آورد. این تکرار موفقیت در دو ترکیب وزنی مستقل آبی نشان‌دهنده پایداری ساختاری مرحله میانی در برابر تغییرات وزن‌دهی معیارها، به‌ویژه معیارهای مرتبط با رفتار فیزیولوژیک و تبخیر-تعرق گیاه است. از آنجا که معیار ضریب گیاهی بازتابی از نیاز تبخیر-تعرق و کارایی مصرف آب گیاه است، نتایج این ترکیب وزنی نیز به‌خوبی مؤید سازگاری مرحله میانی با اصول مدیریت پایدار منابع آب می‌باشد.

در مجموع، بررسی سه ترکیب وزنی نشان داد که مرحله میانی نسبت به تغییرات وزنی حساسیت کمتری داشته و در ترکیب‌های وزنی که معیارهای آبی اهمیت بیشتری دارند همواره رتبه نخست را به دست می‌آورد. از این رو، مرحله میانی از منظر پایداری گزینه‌ای سازگارتر، پایدارتر و کم‌ریسک‌تر است.

این پایداری و حساسیت‌ها، 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، در حالی که 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 مدیریتی شناسایی می‌شود و تمرکز بر تأمین منابع آب، کنترل تنش‌ها و مدیریت سایر نهاده‌های کشاورزی در این مرحله می‌تواند بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی محصول داشته باشد، در حالی که مرحله ابتدایی کمترین حساسیت مدیریتی را دارد و کاهش منابع در آن تأثیر محدودی بر بهره‌وری کلی خواهد داشت (Opricovic & Tzeng, 2004; Tzeng & Huang, 2011; Mousavi, 2020).

۲.۲.۲.۳. تحلیل حساسیت تک‌متغیره

تحلیل حساسیت تک‌متغیره (شکل 3-A) نشان داد که تغییر وزن هر یک از معیارها به میزان $\pm 20\%$ تغییر محسوسی در رتبه‌بندی نهایی ایجاد نمی‌کند و ساختار کلی اولویت‌ها پایدار باقی می‌ماند. در تمام ترکیبات وزنی، مرحله ابتدایی همواره در رتبه آخر قرار گرفت، که نشان‌دهنده حساسیت پایین این گزینه نسبت به تغییر وزن معیارهاست.

برای معیار اول (زیست‌توده)، نتایج نشان داد کاهش و افزایش وزن آن رتبه‌بندی گزینه‌ها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و تمام مراحل رشد نسبت به نوسانات ۲۰ درصدی زیست‌توده پایدار هستند.

در معیار دوم (تبخیر-تعرق)، با افزایش وزن آن، مرحله میانی در رتبه اول قرار گرفت، اما رتبه مرحله ابتدایی و انتهای تغییر کرد و مرحله پایانی به رتبه چهارم تنزل یافت. این موضوع نشان می‌دهد که هر دو مرحله ابتدایی و پایانی نسبت به افزایش وزن تبخیر-تعرق واکنش‌پذیر هستند و تبخیر-تعرق به‌عنوان یک معیار کلیدی در تمایز این دو گزینه عمل می‌کند. با کاهش وزن تبخیر-تعرق، تغییری در رتبه مراحل رشد مشاهده نشد و مرحله میانی رتبه برتری خود را حفظ نمود.

برای معیار سوم (ضریب گیاهی) نیز الگویی مشابه زیست‌توده مشاهده شد: افزایش وزن ضریب گیاهی تأثیری بر پایداری نتایج رتبه‌بندی مراحل رشد نداشت.

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت تک‌متغیره حاکی از پایداری قوی تصمیم‌گیری مدل VIKOR بود؛ به گونه‌ای که حتی با اعمال نوسان ۲۰ درصدی در وزن معیارها، مرحله میانی در تمام موارد به‌عنوان پایدارترین و قوی‌ترین گزینه باقی مانده است.

۳.۲.۲.۳. تحلیل حساسیت چندمتغیره (روش مونت کارلو)

تحلیل حساسیت چندمتغیره به روش مونت‌کارلو با $\pm 20\%$ نوسان در وزن معیارها (شکل 3-B) نشان داد که مراحل رشد میانی و توسعه به طور مداوم در رتبه‌های بالای مدل VIKOR قرار دارند، در حالی که مراحل ابتدایی و پایانی همواره رتبه‌های پایین را کسب کردند. میانگین ۱۰۰ درصدی پایداری رتبه اول نشان می‌دهد که مرحله میانی به عنوان پایدارترین گزینه برای مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. بعد از مرحله میانی، مرحله توسعه با سهم ۱۰۰ درصدی دومین گزینه قابل اعتماد است. به عبارت دیگر، مرحله میانی و توسعه بیشترین انعطاف‌پذیری را در مواجهه با عدم قطعیت وزن‌ها دارند و می‌توانند به عنوان گزینه‌های پایدار و

کم‌ریسک در تصمیم‌گیری مدیریتی انتخاب شوند. مراحل ابتدایی و پایانی با سهم صفر درصدی از رتبه اول، نشان‌دهنده عملکرد پایین و پایدار آن‌ها در تمام شبیه‌سازی‌ها هستند. این نتایج تأکید می‌کند که روش VIKOR تحت تغییرات وزن معیارها مقاوم بوده و نتایج آن از اعتبار تحلیلی کافی برای برنامه‌ریزی پایدار در مدیریت مراحل رشد محصول برخوردار است.

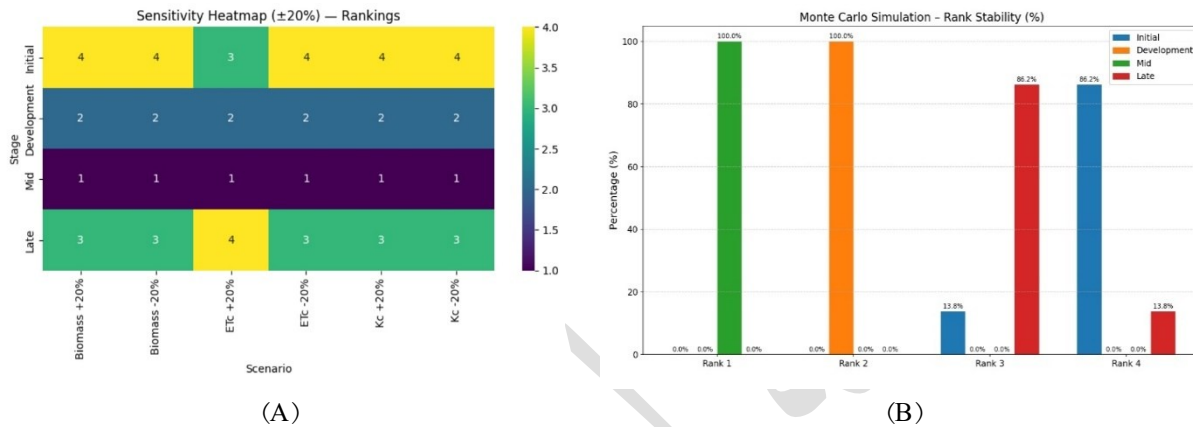


Figure 3. Ranking response of growth stages to criterion weight fluctuations (univariate and multivariate sensitivity analysis)

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، Razzaghi et al. (2020) 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، Liu et al. (2021) در چین نشان دادند که بیشترین تجمع ماده خشک در مرحله میانی رخ می‌دهد و این دوره حساس‌ترین زمان برای تأمین عناصر غذایی و مدیریت تغذیه است. یافته‌های Salim et al. (2022) در عراق نیز نشان داد که تنش آبی در مراحل گل‌دهی و تشکیل دانه بیشترین تأثیر منفی بر عملکرد دارد، در حالی که مرحله بلوغ دانه حساسیت کمتری نسبت به کم‌آبی نشان می‌دهد.

با استفاده از مدل آکواکراپ و پایش دمای سطح برگ (Mendoza-Márquez et al. (2025) دریافته‌اند که مراحل پیش‌گلدهی و گلدهی کینوا بیشترین حساسیت را به تنش آبی دارند و پایش شاخص استرس آبی می‌تواند در زمان‌بندی بهینه آبیاری بسیار مؤثر باشد. همچنین، Salim et al. (2024) 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، Awa et al. (2024) نشان دادند که کم‌آبیاری ملایم بدون کاهش معنادار عملکرد، کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد، در حالی که 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، Pradhan et al. (2025) گزارش کردند که ترکیب مدیریت آبیاری مرحله‌محور با 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، کارایی مصرف آب و کیفیت دانه استفاده شود.

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

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که حساسیت کینوا به کمبود آب در مراحل مختلف رشد متفاوت است و تصمیم‌گیری درباره زمان آبیاری نقش مهمی در افزایش بهره‌وری آب و بهبود عملکرد دارد. تحلیل VIKOR نشان داد که مرحله میانی رشد، پایدارترین و مطلوب‌ترین مرحله برای مدیریت منابع آب است؛ زیرا این مرحله با بیشترین تبخیر-تعرق، بالاترین ضریب گیاهی و سهم زیاد در تجمع زیست‌توده، بیشترین نیاز به تأمین آب دارد. مرحله توسعه نیز بعد از مرحله میانی، به‌عنوان گزینه دوم بهترین مرحله شناخته شد. در مقابل، مراحل ابتدایی و پایانی کمترین اهمیت مدیریتی را داشتند و کاهش منابع آب در این مراحل تأثیر منفی اندکی بر عملکرد نهایی دارد. یافته‌های این پژوهش همچنین بر اهمیت توجه به حساسیت مراحل رشد در مدیریت آبیاری و اعمال کم‌آبیاری ملایم و تأمین حداکثری آب در دوره‌های پیش‌گلدهی، گلدهی و میانی تأکید می‌کند. بر این اساس، توصیه می‌شود برنامه‌ریزی آبیاری کینوا در مناطق نیمه‌خشک بر دوره‌های حساس رشد متمرکز بوده و از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند VIKOR برای انتخاب الگوی بهینه مدیریت منابع استفاده شود. این رویکرد می‌تواند موجب افزایش پایداری تولید، حفظ کیفیت دانه و بهبود کارایی مصرف آب در کشت کینوا گردد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Multi-Criteria Decision Analysis
2. Višekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje

۶. تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

- Aboukhaled, A., Alfaro, J. F., & Smith, M. (1982). Lysimeters. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 39. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Abu Al-Harti, R., et al. (2023). Crop coefficient and evapotranspiration of quinoa under arid conditions. *Journal of Irrigation Science*, 41(4), 231–245.
- Ahmadi, S., et al. (2025). Modeling quinoa growth and water use under semi-arid conditions. *Journal of Arid Land Studies*, 35(1), 12–27. (In Persian)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. Rome: FAO.
- Anonymous. (n.d.). Using VIKOR method to optimally select proposals for water-saving irrigation project. *Journal indexed in DOAJJ*. Retrieved September 25, 2025, from <https://doaj.org/article/14de30092a6344b3a09ec3b36e961daf>
- Awa, M., Zhao, J., & Tumaerbai, H. (2024). Deficit irrigation-based improvement in growth and yield of quinoa in the northwestern arid region in China. *Sustainability*, 16(10), 4136. <https://doi.org/10.3390/su16104136>
- Bahraseman, S. E., et al. (2025). Determining the best strategies to improve agricultural ... Land Use Policy, 139, 107082. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107082>
- Bazile, D., et al. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and challenges. *Food Reviews International*, 32(2), 88–107.
- Biswas, T., Sah, R. P., Kumar, R., Kumar, V., & 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58022-w>.
- FAO. (2021). *Quinoa market report and global production statistics*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Water resources management in Iran*. Rome: FAO.
- Garcia, M., Jacobsen, S.-E., & Cousin, A. (2003). Quinoa crop management in arid environments. *Field Crops Research*, 85(2–3), 129–138.
- Geerts, S., Jacobsen, S.-E., & Raes, D. (2008). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 95(6), 154–160.
- Gómez, J., et al. (2022). Growth and water use efficiency of quinoa in Colombia: Stage-specific irrigation management. *Agricultural Water Management*, 263, 107488.
- Halder, S., Banerjee, S., Youssef, Y. M., Yadav, S., Saha, S., & Saha, A. K. (2025). Ground–surface water assessment for agricultural land prioritization in the Upper Kansai Basin, India: An integrated SWAT–VIKOR framework. *Water*, 17(6), 880. <https://doi.org/10.3390/w17060880>
- 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.
- Howell, T. A., Schneider, A. D., Evett, S. R., & Tolk, J. A. (2004). *Evapotranspiration of irrigated alfalfa in a semi-arid climate*. *Agricultural Water Management*, 65(3), 203–221. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.08.010>
- Iranian Meteorological Organization (IMO). (2021). *Climatological data for Karaj, Iran (1990–2020)*. Tehran: Iranian Meteorological Organization.

- Jacobsen, S. E., Mujica, A., & Jensen, C. R. (2003). The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Reviews International*, 19(1–2), 99–109.
- Jia, L., & Zhang, B. (2024). Water use attribution analysis and prediction based on the VIKOR method and grey neural network model: A case study of Zhangye City. *Atmosphere*, 15(11), 1387. <https://doi.org/10.3390/atmos15111387>
- Jiang, G., Wang, X., Jiang, Q., Bai, Y., Zhang, L., Zhang, P., Liu, J., Li, L., Li, H., Huang, L., Zhang, S., & Qin, P. (2025). Mechanisms of flavonoids in quinoa's response to flooding stress in grain filling stage. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1565697. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1565697> Frontiers
- Jokarfard, A., et al. (2024). Stage-specific water requirements and biomass accumulation of quinoa in semi-arid regions. *Agronomy Research*, 22(1), 101–115.
- Li, H., et al. (2023). Water use efficiency of quinoa during flowering and grain filling under deficit irrigation in China. *Agronomy*, 13(2), 390.
- Liu, F., Song, C., & 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. <https://doi.org/10.1111/grs.12307>
- Matkan, A. A., Darvishzadeh, R., Hosseiniasl, A., Ebrahimi Khufsi, M., & Ebrahimi Khufsi, Z. (2012). Drought segmentation in arid regions using knowledge-based algorithms at GIS environment (case study: Sheitoor, Yazd). *Journal of Climate Research*, 2(5-6), 103-116.
- Mendoza-Márquez, B., Chuchon-Remon, R., Ramos-Fernández, L., Falconí-Palomino, J., Garcia-Lopez, Y., & Gómez-Pando, L. (2025). Water stress thresholds and irrigation management via infrared thermography and AquaCrop model in quinoa cultivation in arid zones. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. <https://doi.org/10.1007/s40003-025-00869-0>
- MirSafii, M., et al. (2024). Biomass accumulation and irrigation management in quinoa: Implications for water use efficiency. *Iranian Journal of Crop Science*, 20(3), 45–59. (In Persian)
- Mousavi, S.F., 2020. Application of Multi-Criteria Decision Making Methods in Sustainable Agriculture. *Agricultural Systems*, 178, 102736.
- Opricovic, S. (1998). *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia.
- Opricovic, S., Tzeng, G.H., 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156, 445–455.
- Pradhan, A., Rane, J., Basavaraj, P. S., Kumar, N., Shid, D., Paul, N. C., Pal, K. K., & Reddy, K. S. (2025). Optimizing crop management strategies for improved yield and resource use: A focus on quinoa. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1522995>
- Qureshi, M. R. N., Singh, R. K., & 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. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9903-7>.
- Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Jacobsen, S. E., & Jensen, C. R. (2020). Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in southern Iran. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(2), 174–188. <https://doi.org/10.1111/jac.12392>
- Razzaghi, F., Jacobsen, S. E., Jensen, C. R., & Andersen, M. N. (2011). *Ion distribution, proline accumulation and growth of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) subjected to saline and water stress*. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 348–360. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00475.x>
- Rojas, W., et al. (2015). Quinoa: An ancient crop to contribute to global food security. *Journal of Food Security*, 3(2), 67–74.

- Salim, B. H., Abdullah, M. J., & Ali, H. R. (2022). Effect of water stress at different growth stages on yield and its components of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *The Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 53(6), 1241–1251. <https://jcoagri.uobaghdad.edu.iq/index.php/intro/article/view/1051>
- Salim, S. A., Rasheed, F. T., Al-Deen, U. H., & Abd Al Muneem, R. (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. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10830413>
- Sanandaji, A., et al. (2024). Stage-specific irrigation effects on yield and water use efficiency of quinoa. *Sustainable Agriculture Research*, 13(2), 33–46. (In Persian)
- Shrestha, S., Garcia, L. A., & Tindall, J. A. (2020). *Field evaluation of weighing lysimeters for crop evapotranspiration measurements under different irrigation methods*. *Agricultural Water Management*, 242, 106413. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106413>
- Shukla, S., Shrestha, N. K. and Jaber, F. H., 2014. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub tropical Florida. *Agricultural Water Management*, 132, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.019>
- Topno, A. R. (2022). Prioritization and identification of vulnerable sub-watersheds using morphometric analysis and an integrated AHP–VIKOR method. *Water Supply*, 22(11), 8050–8068. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.407>
- Tuncel, G., & Gunturk, B. (2024). A fuzzy multi-criteria decision-making approach for agricultural land selection. *Sustainability*, 16 (23), 10509. <https://doi.org/10.3390/su162310509>.
- Tzeng, G.H., Huang, J.J., 2011. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. CRC Press.
- Vega-Gálvez, A., et al. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Science and Technology*, 43(1), 1–12.
- Wang, X., Zhang, P., Qin, Z., Jiang, G., Bai, Y., Zhang, L., Liu, J., Li, L., Li, H., Huang, L., Yang, J., Xie, Y., Zhou, J., & Qin, P. (2025). Joint analysis of transcriptome and metabolome on the accumulation mechanism of flavonoids in quinoa seedlings under flooding stress. *BMC Plant Biology*, 25, 852. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06867-2> [bmcplantbiol.biomedcentral.com](https://www.biomedcentral.com/bmcplantbiol)
- Zhang, X., Xue, Q., & Wang, C. (2024). Deficit irrigation-based improvement in growth and yield of quinoa in an arid environment. *Sustainability*, 16(10), 4136. <https://doi.org/10.3390/su16104136>

Sustainable Irrigation Management Using a Multi-Criteria Decision-Making Approach: A Case Study in Quinoa Cultivation

Reza Mohammadikia

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

rmswri@gmail.com

Abstract

In this study, with the aim of identifying the optimal growth stage of quinoa for sustainable water resource management under the semi-arid conditions of Karaj, three key indicators biomass, crop evapotranspiration (ET_c), and crop coefficient (K_c) were measured across four growth stages (initial, development, mid-season, and late season) and evaluated using a multi-criteria decision-making approach. The data were analyzed based on the results of two years of lysimeter experiments and reference evapotranspiration calculated using the Penman–Monteith method. The results showed that the mid-season stage, characterized by the highest crop coefficient, the greatest water requirement, and a significant contribution to biomass accumulation, achieved the highest rank under equal weighting of the criteria. Sensitivity analysis indicated that the ranking of quinoa growth stages was robust to changes in criterion weights. Across all managerial weighting combinations, as well as in single-variable sensitivity analysis ($\pm 20\%$) and multivariate sensitivity analysis using the Monte Carlo method, the mid-season stage consistently maintained the top rank and was identified as the most stable option in the decision-making process. In contrast, the initial and late growth stages exhibited poor performance across all scenarios. These results suggest that water resource management should focus on the mid-season stage to maximize water productivity and crop yield. The findings of this study provide a practical framework for irrigation planning and optimal allocation of water resources in quinoa cultivation.

Keywords: Crop coefficient, Evapotranspiration, Irrigation management, Monte Carlo method, Water use efficiency