



Impacts of input consumption management on sustainable production of Quinoa: energy use, water use, and environmental implications

Mohammadikia, R. * 

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

Article Type: Research Article

Received: November 10, 2025

Accepted: January 24, 2026

Keywords:

Energy use efficiency, Sensitivity analysis, Multi-Criteria analysis, Monte Carlo simulation, Water use efficiency

Corresponding author's email

address: rmswri@gmail.com

Extended Abstract

Objectives

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) has emerged as a promising climate-resilient crop due to its exceptional adaptability to harsh environmental conditions, including drought, salinity, and poor soil fertility. Its high nutritional value, coupled with its ability to maintain acceptable productivity under limited water availability, has made quinoa an attractive option for diversifying cropping systems and improving food security in arid and semi-arid regions. However, despite its recognized tolerance to environmental stresses, achieving sustainable quinoa production still depends on efficient management of agricultural inputs, particularly water, energy, and agrochemicals, to ensure both economic viability and environmental sustainability. With increasing limitations on water and energy resources and the pressing need for sustainable agriculture in arid and semi-arid regions, optimizing the management of water and agricultural inputs has become crucial for quinoa production. This study is intended to evaluate the effects of optimal input management on quinoa cultivation sustainability, focusing on Energy Use Efficiency (EUE), Water Use Efficiency (WUE), and Environmental Impact Index (EII). Understanding how input management affects energy consumption, water productivity, and environmental impacts is essential for enhancing resource-use efficiency and promoting sustainable cropping systems in water-limited areas.

Material and Methods

A field-based study using lysimeters under controlled management conditions was conducted to quantify system inputs and outputs. System inputs included energy from fuel, water, and electricity as well as fertilizers, pesticides, seeds, and human labor while output energy was calculated based on quinoa grain yield. EUE, WUE, and EII were computed using standard formulas. Additionally, a Monte Carlo simulation was employed for sensitivity analysis to determine the relative effects of different efficiency indicators on system sustainability. To ensure exhaustive sustainability assessment, all the energy equivalents and environmental coefficients associated with agricultural inputs were derived from established conversion factors reported in the literature. Water Use Efficiency was determined based on grain yield relative to the total volume of irrigation water applied during the growing season. The environmental impact index was estimated based on greenhouse gas emissions associated with the use of major agricultural inputs, enabling a comparative evaluation of management performance from both resource-use and environmental perspectives. The integration of deterministic efficiency calculations with probabilistic sensitivity analysis provided a robust framework for identifying the most influential factors affecting the sustainability of quinoa production under arid and semi-arid conditions.

Results

Optimal input management significantly reduced total energy inputs and the environmental impact index but enhanced energy and water use efficiencies. Specifically, total system input energy was estimated at 20,208 MJ ha⁻¹ whereas output energy from quinoa grain reached 49,406 MJ ha⁻¹, resulting in an EUE of 2.44. Water

use efficiency was calculated at 0.81 kg m^{-3} , indicating effective water utilization throughout the growing season. The environmental impact index (EII) was calculated at $2,821 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$, demonstrating a substantial reduction in environmental burden. Sensitivity analysis revealed that system sustainability was most responsive to variations in WUE and EUE, highlighting the critical role of precise management of water and energy inputs in arid and semi-arid cropping systems.

Conclusion

The findings highlight the pivotal role of optimal management of inputs for enhancing energy and water efficiencies and mitigating environmental impacts in quinoa cultivation. A holistic approach integrating precise irrigation scheduling and judicious input application can substantially improve the sustainability of quinoa production in water-limited regions. These results provide valuable insights for policymakers and land managers seeking sustainable agricultural practices and resource-efficient cropping strategies. Furthermore, the integration of energy, water, and environmental indicators in evaluating quinoa production systems provides a comprehensive framework for assessing agricultural sustainability under resource-constrained conditions. The results of this study suggest that improving input-use strategies not only enhances production efficiency but also contributes to reduced ecological footprint of crop production. It is, therefore, essential to adopt such integrated management approaches in order to develop resilient and sustainable farming systems, particularly in arid and semi-arid regions that face increasing pressures from climate change and water scarcity.

Cite this Article: Mohammadikia, R., 2026. Impacts of input consumption management on sustainable production of Quinoa: energy use, water use, and environmental implications. *Journal of Land Management*, 14(1), pp.29-42.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.371102.397>

ارزیابی تأثیر مدیریت مصرف نهاده‌ها بر پایداری تولید کینوا: مصرف انرژی، مصرف آب و پیامدهای محیط‌زیستی

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

چکیده

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۸/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۴

واژه‌های کلیدی:

بهره‌وری انرژی، تحلیل حساسیت،

تحلیل چندمعیاره، روش

مونت کارلو، کارایی مصرف آب

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

rmswri@gmail.com

با افزایش محدودیت منابع آب و انرژی و نیاز به توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدیریت مصرف بهینه آب و نهاده‌های کشاورزی در تولید کینوا اهمیت ویژه‌ای یافته است. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها بر پایداری کشت کینوا با تمرکز بر بهره‌وری انرژی (EUE)، کارایی مصرف آب (WUE) و شاخص محیط‌زیستی (EII) بود. این مطالعه به‌صورت لایسیمیتری و تحت مدیریت کنترل‌شده انجام شد. انرژی ورودی سیستم شامل انرژی ناشی از مصرف سوخت، آب، برق، کود و سم، بذر و نیروی انسانی و انرژی خروجی شامل انرژی حاصل از عملکرد دانه کینوا در نظر گرفته شد. شاخص‌های بهره‌وری انرژی، کارایی مصرف آب و شاخص محیط‌زیستی بر اساس روابط استاندارد محاسبه گردیدند. نتایج نشان داد که مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها در کشت کینوا منجر به کاهش چشمگیر انرژی ورودی و شاخص محیط‌زیستی و افزایش بهره‌وری انرژی و کارایی مصرف آب شد. به‌طور مشخص، انرژی ورودی سیستم برابر ۲۰۲۰۹/۸ مگاژول بر هکتار بود، در حالی که انرژی خروجی حاصل از محصول برابر ۴۹۴۰۶/۷ مگاژول بر هکتار برآورد شد که منجر به بهره‌وری انرژی (EUE) برابر با ۲/۴۴ شد. کارایی مصرف آب (WUE) نیز برابر ۰/۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد که نشان‌دهنده استفاده مؤثر از آب در طول فصل رشد است. شاخص محیط‌زیستی (EII) نیز با مقدار ۲۸۲۱/۶ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل در هکتار کاهش قابل توجه اثرات محیط‌زیستی را نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌ها بیانگر نقش تعیین‌کننده مدیریت آبیاری و مصرف نهاده‌ها در افزایش پایداری تولید کینوا هستند. تحلیل حساسیت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که پایداری سیستم بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات شاخص‌های کارایی مصرف آب و بهره‌وری انرژی دارد، که بر اهمیت مدیریت دقیق این دو مؤلفه در سیستم‌های زراعی مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید می‌کند.

استناد: محمدی‌کیا، رضا، ۱۴۰۵. ارزیابی تأثیر مدیریت مصرف نهاده‌ها بر پایداری تولید کینوا: مصرف انرژی، مصرف آب و پیامدهای محیط‌زیستی. نشریه

مدیریت اراضی، ۱۴(۱)، صص. ۲۹-۴۲.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.371102.397>

مقدمه

افزایش جمعیت جهانی، تغییرات اقلیمی و محدودیت روزافزون منابع طبیعی، به‌ویژه آب و انرژی، چالش‌های اساسی برای بخش کشاورزی ایجاد کرده است (FAO, 2013). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، کشاورزی اصلی‌ترین مصرف‌کننده منابع آب به‌شمار می‌رود، به‌طوری‌که بیش از ۹۴٪ آب برداشت‌شده سالانه در این بخش مصرف می‌شود، درحالی‌که بهره‌وری آب همچنان پایین‌تر از میانگین جهانی گزارش شده است (Alizadeh and Keshavarz, 2005). این شرایط، ضرورت حرکت به‌سوی نظام‌های زراعی کارآمدتر و توسعه محصولات کم‌آب‌بر و سازگار با تنش‌های محیطی را دوچندان کرده است.

در این راستا، کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd.) به‌عنوان گیاهی با توانایی بالای سازگاری با خشکی، شوری و دماهای بالا، از سوی سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد به‌عنوان یکی از محصولات آینده معرفی شده است (Jacobsen, 2003). پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که کینوا نسبت به غلات متداول نیاز آبی کمتری داشته و از کارایی مصرف آب (WUE^1) و بهره‌وری انرژی (EUE^2) بالاتری برخوردار است، به‌گونه‌ای که می‌تواند در شرایط تنش عملکرد قابل قبولی را حفظ کند (Razzaghi et al., 2011b; Ruiz et al., 2014). هم‌زمان، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که کینوا به دلیل برخورداری از صفات مرتبط با بهره‌وری و تحمل خشکی، پتانسیل قابل توجهی برای گسترش کشت در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک و کمک به توسعه کشاورزی پایدار دارد (del Pozo et al., 2023).

از نظر کمی، گزارش‌ها نشان می‌دهد که کارایی مصرف آب کینوا در شرایط خشک بین ۰/۷ تا ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و عملکرد آن در شرایط تنش خشکی و شوری با غلات رایج قابل رقابت است (Ruiz et al., 2014).

افزون بر این، تحمل شوری تا حدود ۱۸ دسی‌زیمنس بر متر، نیاز نیتروژنی کمتر نسبت به گندم و ذرت، و توانایی رشد در خاک‌های کم‌حاصلخیز، از دیگر ویژگی‌هایی است که کینوا را به گزینه‌ای مناسب برای نظام‌های زراعی مناطق خشک تبدیل می‌کند (Razzaghi et al., 2020). از منظر محیط‌زیستی نیز مطالعات حاکی از آن است که کشت کینوا می‌تواند با کاهش مصرف نهاده‌های پراورزی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش مثبتی در بهبود پایداری تولیدات کشاورزی ایفا کند (Lotfalian Dehkordi and Forootan, 2020). در دهه‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های کمی برای ارزیابی پایداری سیستم‌های کشاورزی مورد توجه فزاینده قرار گرفته است. شاخص‌هایی نظیر بهره‌وری انرژی، که نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی را نشان می‌دهد، و کارایی مصرف آب، که میزان محصول تولیدی به ازای واحد آب مصرفی را بیان می‌کند، از مهم‌ترین ابزارهای سنجش کارایی و پایداری نظام‌های تولیدی محسوب می‌شوند (Pimentel and Pimentel, 2008; Zwart and Bastiaanssen, 2004). علاوه بر این، شاخص‌های محیط‌زیستی مانند شاخص بار محیط‌زیستی و ردپای کربن، امکان ارزیابی جامع‌تر اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های کشاورزی را فراهم می‌آورند (Tilman et al., 2002).

با توجه به ماهیت چندبعدی پایداری کشاورزی و محدودیت منابع آب و انرژی، بررسی هم‌زمان این شاخص‌ها مستلزم به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی پیشرفته است. در این زمینه، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ($MCDA^3$) به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی یکپارچه شاخص‌های مختلف پایداری و مقایسه سناریوهای مدیریتی مختلف به‌کار گرفته می‌شوند و می‌توانند در بهینه‌سازی مدیریت نهاده‌ها نقش مؤثری ایفا کنند. مطالعات داخلی و خارجی نشان داده‌اند که استفاده از این روش‌ها

۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی 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 ۱۹۹۲-۲۰۲۱ در منطقه کرج، دمای بیشینه حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه حدود یک درجه سانتی‌گراد بوده است (IMO, 2021).

ویژگی‌های خاک و آب محل پژوهش

به‌منظور تعیین برنامه تغذیه‌ای مناسب برای کشت کینوا، نمونه‌برداری خاک پیش از کاشت از دو عمق ۳۰-۰ و ۶۰-۰ سانتی‌متری انجام شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد تجزیه قرار گرفت. نتایج آزمون خاک (جدول ۱) نشان داد که بافت خاک لوم، اسیدیته آن قلیایی ملایم، هدایت الکتریکی پایین و میزان کربنات کلسیم معادل نسبتاً بالا بوده و خاک در رده خاک‌های آهکی قرار دارد. ماده آلی خاک بسیار کم و مقادیر نیتروژن کل و فسفر قابل جذب در محدوده کم ارزیابی شد، در حالی که پتاسیم قابل جذب خاک در حد متوسط قرار داشت.

از سوی دیگر بر اساس نتایج آنالیز ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری (جدول ۲)، آب آبیاری با هدایت الکتریکی کم و نسبت کاتیون مناسب، ریسک تجمع نمک در ناحیه ریشه را کاهش داده و شرایط ایده‌آل برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق با لایسیمتر فراهم کرد. بنابراین، داده‌های تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده، نماینده شرایط واقعی مزرعه بوده و برای مدیریت آبیاری قابل اعتماد هستند.

می‌تواند به بهبود بهره‌وری منابع، کاهش اثرات محیط‌زیستی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در شرایط منابع محدود منجر شود (Roldán and Moreno, 2021; Lotfalian Dehkordi et al., 2020).

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه سازگاری و عملکرد کینوا، اغلب مطالعات پیشین به بررسی جداگانه شاخص‌های بهره‌وری آب، انرژی یا جنبه‌های فیزیولوژیکی این گیاه پرداخته‌اند و تحلیل جامعی که اثرات متقابل شاخص‌های آب، انرژی و محیط‌زیست را به‌طور هم‌زمان در کشت کینوا ارزیابی کند، به‌ویژه در شرایط اقلیمی ایران، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های کارایی مصرف آب (WUE)، بهره‌وری انرژی (EUE) و شاخص‌های محیط‌زیستی (EII) در سیستم کشت کینوا انجام شده است. این مطالعه بر پایه داده‌های حاصل از یک آزمایش لایسیمتری و با استفاده از روابط استاندارد و رویکردهای تحلیلی مناسب صورت گرفته و می‌تواند شواهد علمی معتبری برای بهینه‌سازی مدیریت آب و انرژی و توسعه پایدار کشت کینوا در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش

پژوهش طی دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۹-۱۳۹۸) در مزرعه ایستگاه تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور واقع در شهرستان کرج با مختصات جغرافیایی

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

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

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری
Table 2 -Irrigation water chemical properties

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

Z_r : عمق مؤثر ریشه (m)

طرح آزمایشی

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) از معادله بیلان آب استفاده شد. در هر سال رقم Titicaca داخل لایسیمتر زهکش‌دار کشت شد. تاریخ کشت به ترتیب ۱۲ مرداد و ۲۵ تیرماه سال‌های زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ و طول دوره رشد ۹۰ روز بود. برای کاهش تأثیر محیط اطراف، ناحیه‌ای با وسعت ۴۰۰ برابر سطح هر لایسیمتر به عنوان کشت حاشیه‌ای در نظر گرفته شد (Thorntwaite and Mather, 1955).

کاهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه به اندازه‌ای بود که رشد و عملکرد گیاه در زمان آبیاری تحت تأثیر تنش قرار نمی‌گرفت و عمق آب آبیاری در هر نوبت به گونه‌ای تنظیم گردید که رطوبت خاک ناحیه ریشه مجدداً با رسیدن به نقطه ظرفیت زراعی تأمین و از تلفات عمقی (زه‌آب) جلوگیری شد. به دلیل عمق زیاد لایسیمتر نسبت به عمق ریشه گیاه، لایه‌های زیر ریشه مانند یک مخزن عمل کردند. این روش مطابق اصول پذیرفته‌شده لایسیمتری زهکش‌دار برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاه است (Allen et al., 1998; Howell et al., 1991; Howell et al., 2004).

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

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

که در آن:

I: عمق آب آبیاری (mm)

F_c: رطوبت خاک در ظرفیت زراعی (%)

θ: رطوبت خاک قبل از آبیاری (%)

برای تعیین عمق مؤثر ریشه با فرض عمق نهایی ۰/۷ متر، برای اوایل فصل رشد (۲۰ روز مرحله ابتدایی رشد) عمق مؤثر ریشه ۳۰ درصد عمق نهایی در نظر گرفته شد. در اواسط رشد (۳۰ روز مرحله توسعه و ۲۵ روز مرحله پایانی) ۶۰ درصد طول عمق نهایی و در مرحله پایانی رشد ۱۰۰ درصد طول عمق نهایی ریشه به عنوان عمق مؤثر ریشه در نظر گرفته شد که در آن کمبود رطوبت به‌طور کامل جبران شده و پروفیل ریشه تا ظرفیت زراعی پر می‌شد. به‌منظور کاهش خطای ناشی از فرض افزایش خطی عمق مؤثر ریشه، پس از برداشت محصول با اندازه‌گیری عمق نهایی ریشه، تغییرات توسعه ریشه در طول فصل رشد با استفاده از معادله غیرخطی گریمز (Grimes and Yamada, 1982) شبیه‌سازی شد و نیاز آبی بر این اساس مجدداً محاسبه گردید.

داده‌های بارش مورد استفاده در این مطالعه از ایستگاه هواشناسی مشکین‌دشت اخذ شد و در محاسبات بیلان آب لحاظ گردید.

رطوبت خاک در ناحیه ریشه مؤثر با استفاده از حسگرهای TDR پایش گردید و تغییرات ذخیره آب (ΔS) از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد.

مدیریت مصرف نهاده‌ها در این پژوهش بر پایه کاهش مصرف نهاده‌های پرانرژی و تنظیم نهاده‌ها بر اساس نیاز گیاه انجام شد. این مدیریت شامل موارد زیر بود:

۱. کوددهی هدفمند بر اساس آزمون خاک به‌منظور جلوگیری از مصرف بیش از نیاز کودهای نیتروژنی و فسفوری.

انرژی مصرفی و شاخص‌های پایداری سیستم

تفاوت بین انرژی ورودی و خروجی معرف انرژی مصرفی سیستم بود و شاخص‌ها بر اساس روابط استاندارد محاسبه گردیدند. برای ارزیابی پایداری زراعت کینوا، سه شاخص اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

۱. بهره‌وری انرژی (EUE) که به صورت نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی محاسبه شد.

۲. شاخص محیط‌زیستی (EII) که برای سنجش اثرات محیط‌زیستی سیستم‌ها به کار گرفته شد و شامل محاسبه ردپای کربن و تأثیرات ناشی از مصرف کود و سوخت فسیلی بود.
۳. کارایی مصرف آب (WUE) که از نسبت محصول برداشت‌شده به مقدار تبخیر-تعرق گیاه تعیین شد.

محاسبه شاخص‌های پایداری سیستم

شاخص بهره‌وری انرژی (EUEI^۴)

پس از محاسبه مجموع انرژی ورودی (E_{in}) و خروجی (E_{out})، بهره‌وری انرژی از نسبت انرژی خروجی (انرژی تولیدی دانه) به انرژی ورودی (مصرفی) (رابطه ۲) محاسبه شد. مقادیر بالاتر از یک نشان‌دهنده کارایی مطلوب سیستم زراعی بود.

$$EUE = E_{out}/E_{in} \quad (2)$$

برای محاسبه شاخص‌های انرژی، ابتدا داده‌های مربوط به نهاده‌های ورودی و خروجی ثبت شد. سپس ضرایب انرژی برای هر نهاده بر اساس مطالعات معتبر بین‌المللی محاسبه گردید (جدول ۳).

انرژی ورودی، مجموع انرژی حاصل از سوخت فسیلی مایع، کود شیمیایی، نیروی انسانی، بذر، برق مصرفی و عمق آب آبیاری برای فعالیت‌های مرتبط با مدیریت آزمایش بود که بر اساس ضرایب انرژی استاندارد و رابطه

زیر محاسبه شد (U.S. Energy Information Administration, 2021; Pimentel and Pimentel, 2008; Lal et al., 2004; Khan et al., 2009; Singh

۲. کاهش عملیات پرمصرف شامل کاهش تردد ماشین‌آلات، حذف شخم عمیق و به حداقل رساندن مصرف سوخت.

۳. مدیریت انرژی از طریق کاهش ساعات پمپاژ آب و بهینه‌سازی نوبت‌های آبیاری.

۴. مدیریت آب از طریق آبیاری بر مبنای نیاز واقعی گیاه و جلوگیری از آبیاری بیش از حد.

مدیریت تغذیه و کوددهی

با توجه به این که، هدف بهینه‌سازی هم‌زمان کارایی مصرف آب (WUE) و بهره‌وری انرژی (EUE) بود، برنامه کودی بر اساس نتایج آزمون خاک و حداقل‌سازی نهاده‌های پرانرژی و افزایش کارایی جذب عناصر غذایی تنظیم گردید. نیتروژن به میزان ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار به صورت کود اوره مصرف شد که ۳۰ درصد آن هنگام کاشت و مابقی در مرحله ۸-۶ برگی گیاه به صورت سرک اعمال گردید. فسفر به میزان ۷۵ کیلوگرم در هکتار به صورت سوپر فسفات تریپل و به طور کامل قبل از کاشت، به صورت نواری در خاک مصرف شد. با توجه به سطح متوسط پتاسیم خاک، ۶۰ کیلوگرم کود پتاس به صورت کلرید پتاسیم در هکتار برای حفظ توازن تغذیه‌ای، جلوگیری از تثبیت پتاسیم در خاک و تضمین جذب مناسب در مراحل اولیه رشد گیاه اعمال شد. به منظور بهبود وضعیت فیزیکی و زیستی خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت، کود دامی کاملاً پوسیده به میزان ۱۰ تن در هکتار پیش از کاشت به خاک اضافه شد. همچنین، با توجه به شرایط آهکی خاک، سولفات روی به میزان ۱۲ کیلوگرم در هکتار به عنوان کود پایه مصرف گردید. این راهبرد تغذیه‌ای با هدف کاهش تلفات عناصر غذایی، افزایش کارایی مصرف آب و انرژی و ارتقای پایداری سیستم کشت کینوا اتخاذ شد.

انرژی خروجی انرژی حاصل از عملکرد دانه که از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$E_{out} = Y * C_p \quad (۴)$$

که در آن:

E_{out} : انرژی کل خروجی از سیستم زراعی (MJ/h)

Y: عملکرد دانه ($kg\ ha^{-1}$)

C_p : انرژی نهفته در هر کیلوگرم دانه (14.7 MJ/kg)

است (Jacobsen, 2003).

et al., 2003b; Hasanpanah et al., 2020; Sonntag and Borgnakke, 2012; Lotfalian Dehkordi et al., (2020; Jacobsen, 2003).

$$E_{in} = \sum_{i=1}^n Q_i * C_i \quad (۳)$$

که در آن:

E_{in} : انرژی کل ورودی به سیستم زراعی (MJ/h)

Q_i : مقدار هر نهاده (واحد مصرفی)

C_i : ضریب انرژی نهاده (i)

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

انرژی تولیدی نهاده مصرفی Energy Produced by Input Consumed (MJ/ha)	منبع Source	ضریب انرژی نهاده Energy Coefficient of Input (MJ/unit)	مقدار نهاده در هکتار Input Quantity per Hectare	واحد Unit	نهاده و نوع آن Input and Type
4505	U.S. Energy Information Administration, 2021	56.31	80	لیتر L (Liter)	سوخت مایع (ورودی) Liquid Fuel (Input)
7937	Pimentel and Pimentel, 2008	66.14	120	کیلوگرم (kg)	کود نیتروژن (ورودی) Nitrogen Fertilizer (Input)
933	Lal et al., 2004	12.44	75	کیلوگرم (kg)	کود فسفر (ورودی) Phosphorus Fertilizer (Input)
669	Khan et al., 2009	11.15	60	کیلوگرم (kg)	کود پتاسیم (ورودی) Potassium Fertilizer (Input)
552.72	Singh et al., 2003b	1.96	282	ساعت h (Hour)	نیروی انسانی (ورودی) Human Labor (Input)
73.5	Hasanpanah et al., 2020	14.7	5	کیلوگرم (kg)	بذر کینوا (ورودی) Quinoa Seed (Input)
1327	Sonntag and Borgnakke, 2012	3.6	370	کیلووات ساعت (kWh)	برق مصرفی (ورودی) Electricity Consumption (Input)
4212.6	Lotfalian Dehkordi et al., 2020	1.02	4130	مترمکعب (m ³)	حجم آب آبیاری (ورودی) Irrigation water volume (Input)
49406.7	Jacobsen, 2003	14.7	3361	کیلوگرم (kg)	عملکرد دانه (خروجی) Grain Yield (Output)

بر اساس روش (Pimentel (2008)، این شاخص

از رابطه زیر محاسبه شد:

$$EII = N + C + S \quad (۵)$$

که در آن:

شاخص محیط‌زیستی (EII^s)

شاخص محیط‌زیستی ترکیبی از سه مؤلفه آلودگی

نیتروژنی، انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت و

تغییر ماده آلی خاک بود.

تغییرات کربن آلی خاک

برای ارزیابی تغییرات کربن آلی خاک، نمونه‌های خاک در ابتدای سال اول و پایان سال دوم کشت با استفاده از روش Walkley-Black (۱۹۳۴) آنالیز شدند. برای تبدیل ماده آلی خاک (SOM^c) به کربن آلی خاک (SOC^v) از رابطه استاندارد زیر استفاده شد:

$$SOC = SOM/1.724 \quad (۸)$$

برای تبدیل تغییرات کربن آلی خاک به انتشار دی اکسیدکربن معادل، از ضریب استاندارد ۳/۶۷ برای تبدیل کربن به دی اکسید کربن معادل استفاده شد، زیرا هر واحد کربن معادل ۳/۶۷ واحد CO_2 است (U.S. EPA/IPCC basis, 2006).

در تحلیل‌های کاربردی، تغییر یک درصد ماده آلی خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متر به‌طور تقریبی معادل ۲۰۰۰۰ کیلوگرم دی اکسیدکربن در نظر گرفته می‌شود، اگرچه مقادیر دقیق ممکن است بسته به چگالی حجمی و عمق نمونه متفاوت باشد. این روش امکان محاسبه تأثیر مدیریت مصرف نهاده‌ها بر انتشار کربن خاک و شاخص محیط-زیستی را فراهم نمود.

شاخص کارایی مصرف آب ($WUEI^a$)

کارایی مصرف آب (WUE) عبارت است از نسبت عملکرد بر تبخیر-تعرق که از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$WUE = Y/ETc \quad (۹)$$

که در آن:

Y: عملکرد دانه (kg/ha)

ETc: تبخیر-تعرق گیاه (m^3/ha)

تحلیل شاخص‌های پایداری سیستم

در این تحلیل، شاخص‌های مورد بررسی شامل بهره‌وری انرژی (EUE)، کارایی مصرف آب (WUE) و

N: تلفات نیتروژن بر اساس تفاوت بین ورودی و جذب گیاه ($kg N ha^{-1} yr^{-1}$) (De Klein et al., 2006).

C: انتشار CO_2 ناشی از مصرف سوخت بر اساس ($kg CO_2 -eq ha^{-1} yr^{-1}$) (IPCC, 2019).

S: درصد تغییر ماده آلی خاک با روش Walkley-Black (Nelson and Sommers, 1996).

آلودگی نیتروژنی

تلفات نیتروژن شامل مقدار نیتروژن ورودی (کود، بذر، آب آبیاری و ماده آلی) منهای مقدار جذب‌شده در گیاه است. بخش تلف‌شده ممکن است به صورت نیترات در آب شسته شود یا به صورت گازهای N_2O و NH_3 منتشر شود. برای محاسبه تلفات نیتروژن به طور تقریبی از رابطه زیر استفاده شد (De Klein et al., 2006; Snyder et al., 2009).

$$N_{loss} (kg.N ha^{-1}) = 0.3 * N_{fertilizer} \quad (۶)$$

یعنی حدود ۳۰ درصد از نیتروژن مصرفی معمولاً تلف می‌شود (در شرایط زراعی ایران بین ۲۵ تا ۴۰ درصد).

انتشار دی اکسیدکربن ناشی از مصرف سوخت

میزان گاز دی اکسیدکربن تولیدشده از سوخت فسیلی مصرف‌شده برای عملیات مزرعه‌ای (شخم، سم‌پاشی، برداشت و...) بر اساس ضریب انتشار IPCC (2019) محاسبه شد:

$$CO_2 = F * EF \quad (۷)$$

که در آن:

CO_2 : دی اکسیدکربن تولیدشده

F: میزان سوخت مصرفی ($L ha^{-1}$)

EF: ضریب انتشار CO_2 برای هر لیتر سوخت دیزل که برابر ۲/۶۸ کیلوگرم دی اکسیدکربن بر لیتر است.

شاخص محیط‌زیستی (EII) بودند که به ترتیب بیانگر کارایی مصرف انرژی، بهره‌گیری از منابع آب و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. برای یکپارچه‌سازی مقیاس شاخص‌ها، مقادیر آن‌ها بین ۰ و ۱ نرمال شدند و سپس با استفاده از روش تحلیل چندمعیاره، میانگین وزنی شاخص‌ها به عنوان امتیاز پایداری سیستم محاسبه شد. برای بررسی پایداری سیستم تحت عدم قطعیت، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار استفاده شد؛ در هر تکرار، مقادیر شاخص‌ها و وزن‌ها $\pm 30\%$ به صورت مستقل و تصادفی نوسان داده شدند و سپس وزن‌ها نرمال‌سازی شدند تا مجموع آن‌ها برابر یک شود. امتیاز پایداری برای هر شبیه‌سازی به صورت میانگین وزنی شاخص‌ها محاسبه شد و برای تحلیل حساسیت، رتبه‌بندی امتیاز پایداری انجام شد و همبستگی اسپیرمن بین هر شاخص و امتیاز و هر رتبه و امتیاز محاسبه گردید تا اثر نسبی هر شاخص بر پایداری سیستم مشخص شود (Saltelli et al., 2008; McKay et al., 2000). تمامی محاسبات و نمودارها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python و کتابخانه‌های numpy، pandas، matplotlib و seaborn انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها بر مصرف انرژی و بهره‌وری انرژی

نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها موجب کاهش قابل توجه انرژی ورودی (۲۰۲۰۹/۸۲ مگاژول بر هکتار) و در عین حال دستیابی به انرژی خروجی نسبتاً بالا (۴۹۴۰۶/۷ مگاژول بر هکتار) شده است که بیانگر کارایی مناسب سیستم تولید از دیدگاه انرژی است. این یافته نشان می‌دهد که کاهش مصرف نهاده‌های پرانرژی نظیر کودهای شیمیایی، سوخت‌های فسیلی و عملیات مکانیزه، در صورت مدیریت صحیح، لزوماً به کاهش عملکرد منجر نمی‌شود، بلکه می‌تواند با افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها، نسبت تبدیل انرژی را بهبود بخشد. مطالعات متعددی تأیید کرده‌اند که سهم بالای کودهای

شیمیایی و سوخت در انرژی ورودی سیستم‌های زراعی، عامل اصلی کاهش بهره‌وری انرژی است و مدیریت دقیق این نهاده‌ها نقش کلیدی در بهبود شاخص‌های انرژی دارد (Mohammadi et al., 2021; Khoshnevisan et al., 2022).

شاخص بهره‌وری انرژی (EUE) در مطالعه حاضر برابر ۲/۴۴ محاسبه شد که نشان‌دهنده مصرف بهینه انرژی و عملکرد مناسب سیستم است. بر اساس گزارش‌های پیشین، مقدار EUE در محصولات زراعی معمولاً در بازه ۲/۷ تا ۸/۶ قرار دارد و تنها در سیستم‌هایی که از مدیریت بهینه نهاده‌ها، کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و بهبود عملیات زراعی استفاده کرده‌اند، مقادیر بالاتر و نزدیک به ۴/۲ گزارش شده است (Hasanpanah et al., 2020; AbdElgalil et al., 2023c). نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که سیستم‌های کشاورزی با رویکرد بهینه‌سازی نهاده‌ها و کاهش مصرف انرژی غیرمستقیم، به طور معنی‌داری بهره‌وری انرژی بالاتری نسبت به سیستم‌های متعارف دارند (Singh et al., 2022; Mousavi-Avval et al., 2023). مقدار بالاتر بهره‌وری انرژی در مطالعه حاضر نسبت به بسیاری از پژوهش‌های پیشین را می‌توان به بهبود تخصیص نهاده‌ها، کاهش مصرف کود و سوخت و افزایش کارایی عملیات مدیریتی نسبت داد.

علاوه بر این، پژوهش‌های جدید تأکید دارند که افزایش بهره‌وری انرژی نه تنها از منظر فنی، بلکه از دیدگاه پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی نیز اهمیت دارد، زیرا کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های تولید می‌شود (Nikkhah et al., 2021; AbdElgalil et al., 2023b). نتایج این پژوهش با ادبیات علمی اخیر همخوانی داشته و نشان می‌دهد که مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها می‌تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر در افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش اتلاف منابع و ارتقای پایداری سیستم‌های تولید محصولات زراعی مورد توجه قرار گیرد.

تأثیر مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها بر کارایی مصرف آب برای شاخص کارایی مصرف آب (WUE)، نتایج این پژوهش نشان داد که مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها نقش مهمی در افزایش آن دارد، به‌طوری‌که مقدار کارایی مصرف آب در این مطالعه برابر 0.81 کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. این مقدار در مقایسه با مقادیر گزارش شده برای محصولات مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که معمولاً بین 0.3 تا 1 کیلوگرم بر مترمکعب قرار دارد، بیانگر استفاده مؤثر از آب و مدیریت بهینه رطوبت خاک است (El-Harty, 2023; Razzaghi et al., 2011a). مدیریت بهینه نهاده‌ها و آب، نیازهای مرحله‌ای رشد کینوا (فنولوژی) را به‌طور دقیق تأمین نمود؛ آبیاری و تغذیه هدفمند در مراحل رشد رویشی، گلدهی و پر شدن دانه، سلامت برگ‌ها و ریشه را حفظ کرد و انتقال مواد آلی به دانه‌ها را بهینه ساخت، که در نهایت منجر به عملکرد بالاتر و افزایش همزمان بهره‌وری انرژی و آب شد.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تنظیم زمان‌بندی آبیاری و بهینه‌سازی مصرف کود می‌تواند به‌طور چشمگیری کارایی مصرف آب را در محصولات زراعی افزایش دهد (Oweis and Hachum, 2006; Zhang et al., 2019; Mousavi-Avval et al., 2023). علاوه بر

این، کاهش مصرف منابع پرانرژی و آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نه تنها موجب ارتقای کارایی سیستم‌های تولید می‌شود، بلکه پیامدهای محیط‌زیستی مرتبط با مصرف آب و انرژی را نیز کاهش می‌دهد (Singh et al., 2022; AbdElgalil et al., 2023b). بنابراین، یافته‌های این پژوهش با شواهد علمی موجود همسو است و نشان می‌دهد که استفاده از استراتژی‌های مدیریت بهینه نهاده‌ها و آب، از جمله کاهش مصرف کود و سوخت، بهبود زمان‌بندی آبیاری و تأمین نیازهای فنولوژیکی گیاه، می‌تواند به‌طور قابل توجهی شاخص‌های بهره‌وری انرژی و آب را بهبود دهد و مسیر توسعه کشاورزی پایدار و کارآمد در مناطق دارای محدودیت منابع را هموار سازد.

تأثیر مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها بر شاخص محیط‌زیستی شاخص محیط‌زیستی (EII)، بدون وزن‌دهی شاخص‌ها، برابر با $2821.6 \text{ kg CO}_2\text{-eq/ha}$ بود. کاهش اثرات محیط‌زیستی در این سیستم عمدتاً ناشی از مصرف بهینه کود نیتروژنه (120 kg/ha)، مصرف محدود سوخت فسیلی (80 L/ha) و کاهش کنترل‌شده کربن آلی خاک (-0.15%) بود. در جدول ۴ مقادیر جزئی شاخص‌های محیط‌زیستی در این مطالعه ارائه شده است.

جدول ۴- ترکیبات شاخص‌های زیست‌محیطی

Table 4- Composition of Environmental Indicators

شاخص (Indicator)	واحد (Unit)	مقدار (Value)
تلفات نیتروژن (Nitrogen Losses)	kg N/ha	36
دی اکسیدکربن تولیدی از سوخت (CO ₂ Emissions from Fuel Combustion)	kg CO ₂ -eq/ha	214.4
تغییر ماده آلی خاک (Change in Soil Organic Matter)	%	-0.15
دی اکسید کربن تولیدی از تغییر کربن آلی خاک (CO ₂ Emissions from Soil Organic Carbon Change)	kg CO ₂ -eq/ha	-3000
قدرمطلق جمع دی اکسید کربن تولیدی معادل (Total Equivalent CO ₂ Emissions)	kg CO ₂ -eq/ha	2785.6
شاخص محیط‌زیستی (Environmental Impact Index)	kg CO ₂ -eq/ha	2821.6

در مورد شاخص محیط‌زیستی (EII)، مقادیر انتشار دی‌اکسیدکربن معادل برای محصولات زراعی متنوع در مطالعات پیشین از حدود ۲۵۰۰ تا بیش از ۱۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Lotfalian, 2020). به‌عنوان مثال، تحقیقی در چین

نشان داد که کاهش سطح کود نیتروژنه به میزان ۲۰ درصد منجر به کاهش انتشار CO₂ و N₂O در خاک شد (Qin et al., 2024). همچنین، مطالعه‌ای در ایالات متحده نشان داد که استفاده بهینه از کود نیتروژنه می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۱۰ درصد کاهش دهد (CAST, 2023).

علاوه بر این، پژوهشی در آلمان نشان داد که سیستم‌های کشاورزی ارگانیک با استفاده کمتر از انرژی و انتشار کمتر CO_2 بهره‌وری انرژی بالاتری دارند (Lotfalian, Dehkordi and Forootan, 2020). مقدار $kg\ CO_2 - eq/ha$ در سیستم حاضر نشان می‌دهد که اثرات محیط‌زیستی تحت مدیریت بهینه نهاده‌ها و آبیاری نسبتاً کم و در چارچوب مقادیر پذیرفته‌شده است. این نتایج اهمیت مدیریت بهینه نهاده‌ها و مصرف منابع را در کاهش اثرات محیط‌زیستی و بهبود پایداری سیستم کشاورزی نشان می‌دهد. این شواهد تأکید می‌کنند که مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها و حفظ ماده آلی خاک می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی اثرات محیط‌زیستی کشاورزی را کاهش دهد و عملکرد محیط‌زیستی مزرعه را بهبود بخشد.

پایداری سیستم زراعی

نتایج شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰۰۰ تکرار (جدول ۵) نشان داد که امتیاز پایداری سیستم مورد بررسی، با در نظر گرفتن نوسانات تصادفی $\pm 30\%$ درصدی در مقادیر شاخص‌ها، دارای میانگین 0.5 و انحراف معیار 0.17 است. نزدیکی مقدار میانه (0.51) به میانگین بیانگر توزیع متقارن امتیاز پایداری و نبود سوگیری سیستماتیک در نتایج است. دامنه تغییرات امتیاز (حداقل 0.02 و حداکثر 0.97) نشان می‌دهد که اگرچه نوسانات شدید در شاخص‌ها می‌تواند به مقادیر حدی منجر شود، اما بخش عمده‌ای از نتایج در بازه بین چارک اول و سوم (0.38 تا 0.62) متمرکز است. این موضوع بیانگر آن است که پایداری سیستم از نظر ساختاری نسبتاً پایدار بوده و نسبت به تغییرات تصادفی شاخص‌ها حساسیت بیش از حد ندارد.

جدول ۵- شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت اسپیرمن امتیاز پایداری

Table 5- Monte Carlo Simulation and Spearman Sensitivity Analysis of Sustainability Score

شاخص Indicator	میانگین Mean Score	انحراف معیار از استاندارد Standard Deviation	ضریب اسپیرمن Spearman (r)	مقدار P p-value
بهره‌وری انرژی (EUE)	0.50	0.17	0.564	0.000
کارایی مصرف آب (WUE)	0.50	0.17	0.574	0.000
محیط‌زیستی (EII)	0.50	0.17	-0.581	0.000

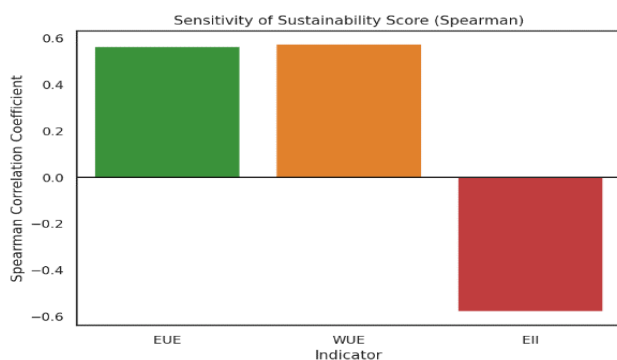
نمودار چگالی امتیاز پایداری حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو (شکل ۱)، توزیعی پهن اما یکنواخت را نشان می‌دهد که بیشترین تراکم آن در حوالی مقدار 0.5 قرار دارد. پهنای متوسط توزیع بیانگر آن است که سیستم در برابر نوسانات هم‌زمان و مستقل شاخص‌ها، انعطاف‌پذیر است، اما از ناپایداری شدید نیز رنج نمی‌برد. نبود قله‌های تیز یا توزیع‌های دووجهی نشان می‌دهد که سیستم در هیچ بازه‌ای دچار رفتار ناپایدار یا بحرانی نمی‌شود و عملکرد آن در طیف وسیعی از شرایط محتمل، قابل‌پیش‌بینی باقی می‌ماند.

و 0.56). این بدان معناست که بهبود این دو شاخص، به‌طور مستقیم موجب افزایش امتیاز پایداری سیستم می‌شود. در مقابل، شاخص محیط‌زیستی (EII) دارای همبستگی منفی با شدت مشابه (-0.58) است که نشان می‌دهد افزایش بار محیط‌زیستی (انتشار معادل CO_2) منجر به کاهش امتیاز پایداری می‌شود. نزدیکی قدر مطلق ضرایب اسپیرمن بیانگر آن است که هر سه شاخص نقش مهمی در تعیین پایداری دارند، اما بهبود کارایی آب و انرژی و کاهش اثرات محیط‌زیستی به‌صورت هم‌زمان برای ارتقای پایداری ضروری است.

نمودار میله‌ای همبستگی اسپیرمن (شکل ۲) به‌وضوح جهت و شدت اثر هر شاخص بر امتیاز پایداری را نشان می‌دهد. میله‌های مثبت مربوط به EUE و WUE بیانگر نقش تقویت‌کننده این شاخص‌ها در پایداری سیستم

نتایج همبستگی اسپیرمن (r) بین شاخص‌ها و امتیاز پایداری نشان داد که شاخص بهره‌وری مصرف آب (WUE) و شاخص بهره‌وری انرژی (EUE) دارای رابطه مثبت و نسبتاً قوی با امتیاز پایداری هستند (به‌ترتیب 0.57

از نظر آماری پایدار و از نظر مفهومی قابل اتکا است. بهره‌وری انرژی و کارایی مصرف آب مهم‌ترین عوامل افزایش پایدار هستند، در حالی که کاهش بار محیط-زیستی نقش کلیدی در جلوگیری از افت امتیاز پایداری ایفا می‌کند. این یافته‌ها اعتبار استفاده از شاخص ترکیبی پایداری و رویکرد تحلیل حساسیت پیشنهادی را برای ارزیابی سیستم‌های کشاورزی تأیید می‌کند.

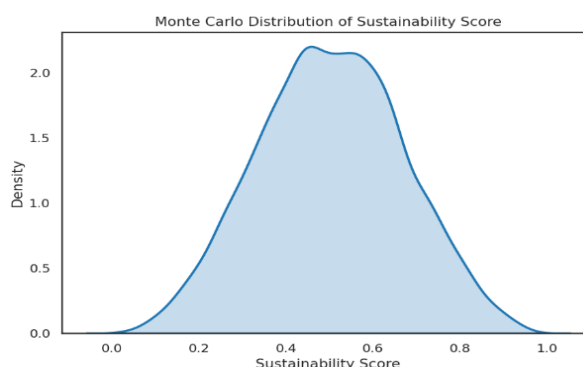


شکل ۲- نمودار ستونی ضریب اسپیرمن

Figure 2- Bar chart of Spearman's correlation coefficients

هستند، در حالی که میله منفی EII نقش بازدارنده فشارهای محیط‌زیستی را منعکس می‌کند. تقارن نسبی ارتفاع میله‌ها از نظر قدر مطلق نشان می‌دهد که بهبود پایداری سیستم نیازمند رویکردی یکپارچه است و تمرکز صرف بر یک شاخص، بدون توجه به سایر مؤلفه‌ها، نمی‌تواند منجر به ارتقای معنادار پایداری شود.

به‌طور کلی، نتایج مونت کارلو و تحلیل حساسیت اسپیرمن نشان می‌دهد که امتیاز پایداری سیستم مورد مطالعه



شکل ۱- نمودار چگالی یا توزیع احتمال

Figure 1- Probability density distribution

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که زراعت کینوا عملکرد بالایی در شاخص‌های انرژی، آب و محیط‌زیست دارد. مدیریت بهینه مصرف نهاده‌ها، منجر به کاهش چشمگیر انرژی ورودی و افزایش انرژی خروجی شد، به‌طوری که بهره‌وری انرژی (EUE) برابر با ۲/۴۴ محاسبه شد. همچنین، کارایی مصرف آب (WUE) در این سیستم زراعی بالا بود، که نشان‌دهنده استفاده مؤثر از آب از طریق برنامه‌ریزی مناسب آبیاری و مدیریت بهینه رطوبت خاک است. شاخص محیط‌زیستی (EII) نیز به شکل قابل توجهی پایین بود، که ناشی از مصرف بهینه کود نیتروژنه و سوخت، تغییرات اندک کربن آلی خاک و مدیریت بهینه نهاده‌ها و ماشین‌آلات است. تحلیل مونت کارلو نشان داد که این سیستم در مواجهه با تغییرات تصادفی و نوسانات نهاده‌ها دارای پایداری مطلوبی است و شاخص‌های بهره‌وری انرژی (EUE) و کارایی مصرف آب (WUE) بیشترین

نتایج این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب و به‌کارگیری روش‌های آبیاری کارآمد، نقش اساسی در افزایش بهره‌وری و بهبود پایداری کشاورزی دارد و سیستم‌های زراعی با مصرف کمتر سوخت و کود، دارای شاخص محیط‌زیستی پایین‌تر و پایداری بلندمدت بیشتری هستند. این نتایج با یافته‌های مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که پژوهش‌های انجام‌شده نیز بر اهمیت مدیریت بهینه آب و انتخاب روش‌های آبیاری کارآمد به‌عنوان مؤثرترین عوامل در ارتقای بهره‌وری و پایداری کشاورزی تأکید کرده‌اند و کاهش مصرف نهاده‌هایی نظیر سوخت و کود را عاملی کلیدی در کاهش پیامدهای محیط‌زیستی و افزایش پایداری بلندمدت معرفی کرده‌اند (Razzaghi et al., 2011a; El-Harty, 2023; Lotfalian Dehkordi and Forootan, 2020).

سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های آبیاری و آموزش کشاورزان برای مدیریت بهینه منابع آب را برجسته می‌کنند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

تأثیر را بر پایداری سیستم زراعی دارند. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که اتخاذ رویکردهای مدیریتی بهینه، شامل کاهش مصرف نهاده‌های پراثری و بهینه‌سازی آبیاری، می‌تواند هم بهره‌وری انرژی و آب را افزایش دهد و هم اثرات محیط‌زیستی را کاهش دهد. این رویکردها به‌عنوان راهکارهایی مؤثر برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند و اهمیت

Referens

1. AbdElgalil, A. A., Seleiman, M. F., Alotaibi, M. and Refay, Y., 2023a. Energy use efficiency, greenhouse gas emissions and economic analysis of sustainable crop production systems. *Energy*, 263, 125742. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.125742>
2. AbdElgalil, A. A., Seleiman, M. F., Alotaibi, M. and Refay, Y., 2023b. Energy indices and environmental impacts of crop production systems under different management strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 45821–45835. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26345-9>
3. AbdElgalil, M. A., El-Harty, E. H. and Alotaibi, M. O., 2023c. Energy efficiency and environmental performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under different irrigation regimes in arid regions. *Agricultural Water Management*, 280, 108269. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108269>
4. Alizadeh, A. and Keshavarz, A., 2005. Status of agricultural water use in Iran. In *Water conservation, reuse, and recycling: Proceedings of an Iranian–American workshop* (pp. 94–105). Washington, DC: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11241>
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). Rome: FAO.
6. CAST, 2023. Potential for U.S. agriculture to be greenhouse gas negative (Report). <https://cast-science.org/publication/potential-for-u-s-agriculture-to-be-greenhouse-gas-negative/>
7. De Klein, C., Novoa, R. S. A., Ogle, S., Smith, K. A., Rochette, P. and Wirth, T. C., 2006. N₂ O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use (Chapter 11)*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
8. Lotfalian Dehkordi, A. and Forootan, M., 2020. Estimation of energy flow and environmental impacts of quinoa cultivation through life cycle assessment methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 21836–21846. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08576-9>
9. Del Pozo, A., Ruf, K. and Alfaro, C., 2023. Traits associated with higher productivity and resilience to drought prone Mediterranean environments of coastal lowland quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 299, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108985>
10. El-Harty, E. H., 2023. Effect of irrigation and fertilization management on water use efficiency and productivity of quinoa in semi-arid environments. *Irrigation Science*, 41, 123–137. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00891-9>
11. El-Harty, E. H., Khan, M. A., Seleiman, M. F., Afzal, M. and Alghamdi, S., 2023. Water use efficiency and productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes under different irrigation regimes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(2), 13209. <https://doi.org/10.15835/nbha51213209>

12. FAO, 2013. The state of food and agriculture: Food systems for better nutrition. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
13. Grimes, D. W. and Yamada, H., 1982. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential. *Crop Science*, 22(1), 134–139.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1982.0011183X002200010032x>
14. Hasanpanah, A., Rahimzadeh Khoei, F. and Bakhshandeh, A., 2020a. Energy and environmental analysis of quinoa (*Chenopodium quinoa*) production systems under different fertilization levels in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123–141.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124219>
15. Hasanpanah, M., Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S. and Firouzi, S., 2020b. Energy efficiency and environmental impacts of crop production systems: A comparative assessment. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120267.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267>
16. Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A. and Schneider, A. D., 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), 277–285.
17. 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.
18. IPCC, 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
19. Iranian Meteorological Organization (IMO), 2021. Climatological data for Karaj, Iran (1990–2020). Tehran: Iranian Meteorological Organization. (In Persian)
20. Jacobsen, S. E., 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1), 167–177.
21. Khan, M. A., Awan, I. U., Zafar, J. and Bakhsh, A., 2009. Energy requirement and economic analysis of rice production in Dera Ismail Khan District of Pakistan. *Plant, Soil and Environment*, 55(5), 197–203.
22. Khoshnevisan, B., Rafiee, S., Omid, M., Mousavi-Avval, S. H. and Clark, S., 2022. Energy flow modeling and optimization in agricultural systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102198. **<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102198>**
23. Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 30(7), 981–990. **<https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005>**
24. Matkan, Ali Akbar.A., Darvishzadeh, Roshanak. B., Hosseiniasl, Amin.C., Ebrahimi Khusfid, Mohsen., Ebrahimi Khusfie, Zohre, (2012). Knowledge based drought risk zonation in arid regions using GIS (Case study: Sheitoor, Yazd), *Journal of Climate Research*, 2(5), 103. Magiran.com/p1157038. (In Persian)
25. McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J., 2000. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42(1), 55–61. **<https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10485979>**
26. Mohammadi, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S. and Mousavi-Avval, S. H., 2021. Energy use efficiency and environmental impacts of agricultural production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110889.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110889>
27. Mousavi-Avval, S. H., Rafiee, S. and Firouzi, S., 2023. Integrated assessment of energy use efficiency and water productivity in crop production systems. *Energy Reports*, 9, 2145–2156. **<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.094>**
28. Nelson, D. W. and Sommers, L. E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In D. L. Sparks et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods* (pp. 961–1010). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
29. Nikkhah, A., Khojastehpour, M. and Emadi, B., 2021. Energy, economic and environmental assessment of agricultural systems under sustainable management. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40(6), e13693.
<https://doi.org/10.1002/ep.13693>

30. Oweis, T. and Hachum, A., 2006. Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.003>
31. Pimentel, D. and Pimentel, M., 2008. Food, energy, and society (3rd ed.). CRC Press.
32. Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Jacobsen, S. E., Jensen, C. R. and Andersen, M. N., 2011a. Effects of salinity and soil drying on radiation use efficiency, water productivity and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 348–360. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00473.x>
33. Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Jacobsen, S.-E., Jensen, C. R. and Andersen, M. N., 2020. Salinity tolerance and grain yield of quinoa under high soil salinity. *Agricultural Water Management*, 234, 106122.
34. Razzaghi, F., Tashiro, K. and Miyanaga, A., 2011b. Water use efficiency and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in comparison with wheat, barley, and rice in the semi-arid region of Iran. *Agricultural Water Management*, 98(9), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.005>
35. Roldán Cañas, J. and Moreno Pérez, M. F., 2021. Water and irrigation management in arid and semiarid zones. *Water*, 13(17), 2446. <https://doi.org/10.3390/w13172446>
36. Ruiz, K. B., Biondi, S., Oses, R. and Murphy, K., 2021. Yield performance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress conditions. *Field Crops Research*, 270, 108223.
37. Ruiz, K., Rojas, W. and Jacobsen, S. E., 2014. Quinoa: Nutritional value and medicinal uses. *Food Research International*, 61, 1–8.
38. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. and Tarantola, S., 2008. Global sensitivity analysis: The primer. John Wiley and Sons.
39. Singh, H., Mishra, D., Nahar, N. M. and Ranjan, M., 2003a. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone India: Part II. *Energy Conversion and Management*, 44(7), 1053–1067. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00115-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00115-2)
40. Singh, R., Sharma, R. and Singh, H., 2022. Energy and water productivity assessment for sustainable agriculture under arid and semi-arid environments. *Agricultural Systems*, 198, 103393.
41. Singh, R., Singh, H. and Singh, J., 2003b. Energy inputs and outputs in production agriculture: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 18(3), 165–174.
42. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. and Fixen, P. E., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 133(3–4), 247–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>
43. Sonntag, R. E. and Borgnakke, C., 2012. Fundamentals of Thermodynamics. Wiley.
44. Thornthwaite, C. and Mather, J., 1955. The water balance. Laboratory of Climatology. NJ. 104 Pages.
45. Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. and Polasky, S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
46. Walkley, A. and Black, I. A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
47. Zhang, H., Wang, X., You, M. and Liu, C., 2019. Water–yield relations and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 221, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.002>
48. Zwart, S. J. and Bastiaanssen, W. G. M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>