

Estimation of Greenhouse Gas Emission Reduction, Social Costs of Pollutants, and Energy Use Efficiency Improvement in Wheat Cultivation under Site-Specific Management of Chemical Inputs

A. Jalilian^{1*}, M. M. Ghasemi², H. Ghasemi Mobtaker³, A. Kaab^{3,4}

1- Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

3- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Mechanization and Remote Sensing Expert, Sugarcane Agro-Industrial Development Company of Khuzestan Province, Ahwaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.96928.1453>

Introduction

Improving the sustainability of agricultural systems requires the optimisation of inputs use, especially chemical fertilisers and pesticides, which are major contributors to energy consumption and environmental degradation. Variable Rate Technology (VRT), as a precision agriculture strategy, allows site-specific management of inputs based on spatial variability in soil fertility, weed distribution, and crop requirements. Although VRT has shown promise in enhancing resource-use efficiency, its integrated effects on energy indicators and environmental burdens in wheat production under irrigated conditions remain insufficiently investigated. This study assessed the impact of VRT on energy performance and environmental emissions in comparison with conventional uniform application, using a real six-hectare winter wheat field in Karaj, Iran.

Materials and Methods

A comprehensive field-scale simulation of VRT was conducted for nitrogen, phosphorus, potassium fertilisers, herbicides, and insecticides. Spatial maps of soil fertility and weed distribution were generated using UAV-based remote sensing and ground sampling. Two scenarios were examined: (1) VRT-based variable application of chemical inputs and (2) conventional uniform application. Energy inputs and other outputs were calculated based on standard coefficients and categorised as direct, indirect, renewable, and non-renewable. Environmental impacts, including Global Warming Potential (GWP) and pollutant emissions to air, water, and soil, were quantified using the ReCiPe 2016 Midpoint (H) method. All results were compared for the production of 34,800 kg of wheat.

Results and Discussion

Energy Indicators

The total energy input under VRT (131,631.57 MJ) was lower than that of consumed under conventional management (160,318.55 MJ). Direct and indirect energy uses declined by 12.64 MJ and 19.31 MJ, respectively, in the VRT system. VRT improved all energy indicators i.e., energy ratio increased to 6.82 (21.79% higher than the conventional method), energy productivity rose to 0.264 kg MJ⁻¹, and energy intensity decreased to 3.78 MJ kg⁻¹. Net energy under VRT reached 765,705.76 MJ, exceeding the conventional value. Major reductions were attributed to substantial decreases in herbicide use (80.40%) and potassium fertiliser (77%), driven by UAV-derived weed distribution maps and soil fertility maps.

Environmental Impacts

The GWP of the VRT scenario was 17,691.21 kg CO₂-eq, representing approximately a 20% reduction compared to the 22,202.74 kg CO₂-eq emitted under conventional application. Nearly half of the GWP originated from direct field emissions, followed by nitrogen fertiliser use. Optimisation of nitrogen rates and reduced field-level emissions were the primary contributors to the decrease. Pollutant emissions to the atmosphere also declined significantly: CO₂ by 16.2%, N₂O by 21.9%, and NH₃ by 22.5%. Waterborne pollutants were reduced, with nitrate declining by 22.4% and phosphorus by 38.9%. Heavy metal emissions to soil also decreased, with Pb reduced by 22.4% and Zn by 35.0%, while elements with naturally low

accumulation (Fe, B, Mn, Mo) remained unchanged. These improvements align with previous international findings demonstrating the effectiveness of UAV-assisted VRT in reducing chemical inputs, enhancing energy efficiency, and minimising environmental pollution across diverse cropping systems.

Conclusion

The results demonstrate that implementing VRT for applying chemical inputs in wheat production substantially reduces both energy consumption and environmental impacts. Compared with the conventional uniform method, VRT improved all energy indicators, decreased total energy inputs, and increased net energy output. Environmentally, VRT reduced GWP by roughly 20%, lowered key atmospheric pollutants, and substantially decreased nutrient leaching and heavy metal accumulation in soil. Overall, VRT proves to be a highly effective strategy for achieving sustainable wheat production through optimised input management, enhanced energy efficiency, and minimised ecological burdens.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the support of the agricultural research team and field specialists involved in data collection, UAV operations, and soil and crop analyses throughout the study.

Keywords: Energy Efficiency, Environmental Emissions, Global Warming Potential, Precision Agriculture, UAV Remote Sensing, Variable Rate Technology, Wheat Production

برآورد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، هزینه اجتماعی آلاینده‌ها و ارتقای کارایی مصرف انرژی در کشت گندم در مدیریت مکان محور نهاده‌های شیمیایی

اشکان جلیلیان^{۱*}، محمد مهدی قاسمی^۲، حسن قاسمی مبتکر^۳، علی کعب^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

افزایش بهره‌وری مصرف نهاده‌های شیمیایی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، از چالش‌های اصلی کشاورزی مدرن است. مصرف بی‌رویه کودها و علف‌کش‌ها ضمن افزایش هزینه‌های تولید، باعث تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی منابع آب و خاک می‌شود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثر کاربرد نرخ متغیر کودها و علف‌کش‌ها بر شاخص‌های انرژی و انتشار آلاینده‌ها در کشت گندم آبی انجام شد. مطالعه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه‌ای تحقیقاتی به وسعت ۶ هکتار در کرج، استان البرز، با دو رویکرد مدیریتی شامل روش مرسوم و فناوری نرخ متغیر (VRT) اجرا شد. در رویکرد VRT، با استفاده از تصاویر پهپاد چندطیفی و داده‌های خاک، نقشه‌های مکانی توزیع عناصر غذایی تهیه و نرخ بهینه مصرف نیتروژن، فسفر، پتاسیم و علف‌کش‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد که مصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب ۲۲/۲، ۳۸/۹ و ۷۷ درصد و مصرف علف‌کش ۸۲/۴ درصد کاهش یافت. ورودی کل انرژی در رویکرد نرخ متغیر ۱۷/۴ درصد کمتر بود و شاخص‌های نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و انرژی خالص به ترتیب ۱۸/۹، ۲۱/۴ و ۲۲/۷ درصد افزایش یافتند. ارزیابی چرخه زندگی با روش ReCiPe2016 نشان داد که کاربرد نرخ متغیر نهاده‌ها پتانسیل گرمایش جهانی را ۲۷/۸ درصد و میانگین انتشار آلاینده‌ها را حدود ۲۳ درصد کاهش داد. نتایج بیانگر آن است که فناوری نرخ متغیر می‌تواند ضمن کاهش مصرف نهاده‌ها و انتشار آلاینده‌ها، کارایی انرژی و پایداری تولید گندم را به شکل قابل توجهی بهبود دهد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیط‌زیست، بهره‌وری منابع، کشاورزی پایدار، تأثیرات زیست‌محیطی، کارایی نهاده‌ها

مقدمه

کشاورزی مدرن با هدف افزایش عملکرد، بر استفاده گسترده از کودهای شیمیایی تکیه دارد؛ با این حال، رویکردهای کوتاه‌مدت در مدیریت اراضی می‌تواند پایداری بلندمدت تولید غذا را تهدید کند (Radočaj, Jurišić, & Gašparović, 2022). مدیریت نادرست و درک ناکافی از نحوه مصرف کودها، آثار منفی قابل توجهی بر محیط‌زیست و منابع طبیعی بر جای می‌گذارد (Pogrzeba, Rusinowski, & Krzyżak, 2018). هرچند کودهای نیتروژن

(N)، فسفر (P) و پتاسیم (K) موجب افزایش عملکرد می‌شوند، اما کارایی مصرف پایین آن‌ها منجر به نشت نیترات به منابع آب و انتشار اکسید نیتروژن در اتمسفر می‌شود (Kaab, Sharifi, Mobli, Nabavi-Pelesaraei, & Chau, 2019a). این دو ترکیب، از گونه‌های فعال نیتروژن بوده و به ترتیب به عنوان گاز گلخانه‌ای و آلاینده آب‌های زیرزمینی، در بروز گرمایش جهانی و تهدید سلامت انسان نقش دارند (Hou et al., 2024).

علف‌های هرز از مهم‌ترین عوامل زیستی کاهش‌دهنده عملکرد محصولات در جهان هستند (Esposito, Crimaldi, Cirillo, Sarghini, & Maggio, 2021). این گیاهان با رقابت برای آب، مواد غذایی، نور و فضا، رشد گیاه زراعی را محدود کرده و بسته به تراکمشان می‌توانند خسارت‌های متفاوتی به بار آورند (Ghasemi-Mobtaker, Mostashari-Rad, Saber, Chau, & Nabavi-Pelesaraei, 2020). انعطاف‌پذیری ریخت‌شناسی، فیزیولوژیکی و آناتومیکی بالای آن‌ها سبب سازگاری بیشتر در برابر تنش‌های محیطی و در نتیجه کاهش عملکرد گیاهان زراعی می‌شود (Kaur, Kaur, & Chauhan, 2018). افزون بر این، علف‌های هرز می‌توانند

۱- گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، ایران

۳- گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- کارشناس مکانیزاسیون و سنجش از دور، شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2026.96928.1453>

پرواز در ارتفاع پایین، تصاویر چندطیفی با وضوح بالا برای پایش و مدیریت مزرعه فراهم می‌کنند (Monteiro & Santos, 2022; Saha et al., 2018). این تصاویر، همراه با داده‌های حاصل از سنجنش از دور، GPS و GIS، امکان شناسایی مکانی علف‌های هرز و اجرای مدیریت هدفمند را فراهم می‌سازند (Radočaj et al., 2022). نقشه‌برداری علف‌های هرز با UAV ها نقش مهمی در کاهش مصرف نهاده‌ها، محدود کردن اثرات زیست‌محیطی و بهبود عملکرد محصولات دارد (Roslim et al., 2021). با وجود شواهد گسترده در کاربرد VRT و UAV ها در مدیریت نهاده‌ها، هنوز اطلاعات محدودی در زمینه ارزیابی هم‌زمان اثرات این فناوری‌ها بر شاخص‌های انرژی و انتشار آلاینده‌ها در مزرعه‌های گندم آبی ایران موجود است. این شکاف علمی نشان می‌دهد که بررسی جامع مصرف انرژی، بهره‌وری نهاده‌ها و کاهش آلاینده‌ها در شرایط واقعی مزرعه‌ای، نیازمند پژوهش‌های کاربردی و داده‌محور است.

در زمینه تغذیه گیاهی، استفاده از داده‌های مکانی برای مدیریت نیتروژن در کشت گندم موجب افزایش کارایی مصرف و کاهش انتشار اکسید نیتروژن شده است (You, Yao, Xu, Zhang, & Meng, 2022). همچنین، به‌کارگیری فناوری سنجنش از دور باعث بهبود کارایی کوددهی و کاهش آلاینده‌های محیطی می‌شود (Radočaj et al., 2022). در مدیریت علف‌های هرز، روش‌های مکان‌محور (SSWM²) می‌توانند مصرف علف‌کش‌ها را ۶۰-۴۰ درصد کاهش دهند (Jensen, Jacobsen, Pedersen, & Tavella, 2012)، در حالی که فراتحلیل‌ها از کاهش ۹۷ درصد در مصرف علف‌کش، ۷۰ درصد در حشره‌کش و ۸۹ درصد در تراکم علف‌های هرز خبر می‌دهند (Anastasiou et al., 2023). کاربرد فناوری نرخ متغیر (VRT) در مدیریت علف‌کش‌ها نشان داده است که می‌تواند مصرف علف‌کش‌ها را تا ۹۳ درصد و هزینه‌های عملیاتی را ۳۴ یورو در هر هکتار کاهش دهد (Gutjahr, Sökefeld, & Gerhards, 2012). همچنین، مطالعات مبتنی بر UAV نشان می‌دهند که حسگرهای RGB توانایی شناسایی ۹۲-۹۷ درصد علف‌های هرز را دارند و کنترل هدفمند گونه‌هایی مانند *Galium aparine* و *Setaria faberi* در مزارع گندم با اثربخشی تا ۹۸ درصد امکان‌پذیر است. ادغام UAV ها با هوش مصنوعی و حسگرهای طیفی، چشم‌اندازی نویدبخش برای مدیریت دقیق علف‌های هرز فراهم می‌کند (Meesaragandla et al., 2024).

افزایش بهره‌وری انرژی و بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها از اهداف کلیدی کشاورزی مدرن است، زیرا مدیریت مؤثر منابع در مراحل مختلف تولید از اتلاف و آسیب زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند (Jalilian, Jahansouz, Ghasemi Mobtaker, Oveisi, &

به‌عنوان پناهگاه آفات گیاهی مانند حشرات، قارچ‌ها و باکتری‌ها عمل کرده و خطر آلودگی محصولات مجاور را افزایش دهند (Taherzadeh-Shalmaei et al., 2023). در سطح جهانی، رقابت علف‌های هرز موجب کاهش قابل توجه عملکرد محصولات اصلی مانند گندم (۲۳ درصد)، سویا (۳۷ درصد)، برنج (۳۷ درصد)، ذرت (۴۰ درصد)، پنبه (۳۶ درصد) و سیب‌زمینی (۳۰ درصد) می‌شود (Soltani et al., 2016). در آمریکای شمالی، این خسارت برای ذرت و سویا تا ۵۰ درصد تولید سالانه رسیده و زیانی بیش از ۲۶/۷ میلیارد دلار در پی دارد. روش‌های کنترل علف‌های هرز شامل وجین دستی، استفاده از علف‌کش‌های شیمیایی، روش‌های مکانیکی، راهکارهای پایدار و فناوری‌های هوش مصنوعی است (Meesaragandla, Jagtap, Khatri, Madan, & Vadduri, 2024). با وجود کارایی بالای علف‌کش‌های شیمیایی در کاهش تراکم علف‌های هرز (Basavalingaiah et al., 2020)، مصرف بی‌رویه آن‌ها اثرات منفی بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارد (MacLaren, Storkey, Menegat, Metcalfe, & Dehnen-Schmutz, 2020). از این‌رو، رویکردهای نوین و سیاست‌های جهانی، به‌ویژه در اتحادیه اروپا، بر کاهش مصرف علف‌کش‌ها و بهینه‌سازی کاربرد آن‌ها تأکید دارند (Monteiro & Santos, 2022). برآوردها نشان می‌دهد سالانه حدود دو میلیون تن آفت‌کش در کشاورزی مصرف می‌شود که ۴۷/۵ درصد آن مربوط به علف‌کش‌هاست (Sharma et al., 2019).

کشاورزی دقیق (PA)^۱ با رویکرد داده‌محور و با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین به‌عنوان یکی از پایه‌های کشاورزی پایدار امکان بهینه‌سازی مصرف نهاده‌های کشاورزی را ممکن ساخته است (Misbah, Laamrani, Khechba, Dhiba, & Chehbouni, 2021). در این چارچوب، کاربرد هدفمند کود به‌منزله سرمایه‌گذاری راهبردی برای افزایش بهره‌وری هر ناحیه زراعی محسوب می‌شود (Radočaj et al., 2022). کشاورزی دقیق با شناسایی تنوع مکانی زمین، به کاهش هزینه‌ها و مصرف منابع و درعین‌حال بهبود عملکرد محصولات کمک می‌کند (Esposito et al., 2021). تقسیم مزرعه به نواحی مدیریتی کوچک‌تر نیز کنترل مکانی ویژه را بهبود می‌بخشد (Wang et al., 2023). از فناوری‌های کلیدی این نظام، کاربرد نرخ متغیر (VRT) است که بر اساس داده‌های سنجنش از دور یا حسگرهای میدانی، میزان نهاده‌ها را متناسب با نیاز هر بخش از زمین تنظیم می‌کند. به‌کارگیری VRT با کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی، کمینه‌سازی آلودگی، افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و بهبود عملکرد و سودآوری، گامی مؤثر در جهت کشاورزی پایدار محسوب می‌شود (Fabiani et al., 2020). پهپادها (UAVs) از مؤثرترین فناوری‌های کشاورزی دقیق به‌شمار می‌آیند و با قابلیت

امکان سنجش مستقیم تاثیر مدیریت مکان محور نهاده‌ها بر عملکرد محصول و اثرات زیست محیطی را فراهم می‌آورد، که تاکنون در مطالعات مشابه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، فرض می‌شود که به کارگیری فناوری نرخ متغیر (VRT) در مصرف کودها و علف کش‌ها می‌تواند مصرف نهاده‌ها، انرژی و انتشار آلاینده‌ها را کاهش داده و در عین حال عملکرد گندم آبی را حفظ کند. از این رو، کاربرد این روش می‌تواند مقدار آلاینده‌های تولیدی در کشت گندم تحت سیستم نرخ متغیر را نسبت به روش مرسوم به طور معنی‌داری کاهش دهد. بر این اساس، هدف این مطالعه، ارزیابی اثر کاربرد نرخ متغیر نهاده‌های شیمیایی بر رد پای زیست محیطی و شاخص‌های انرژی در مزرعه‌ای شش هکتاری از گندم آبی است.

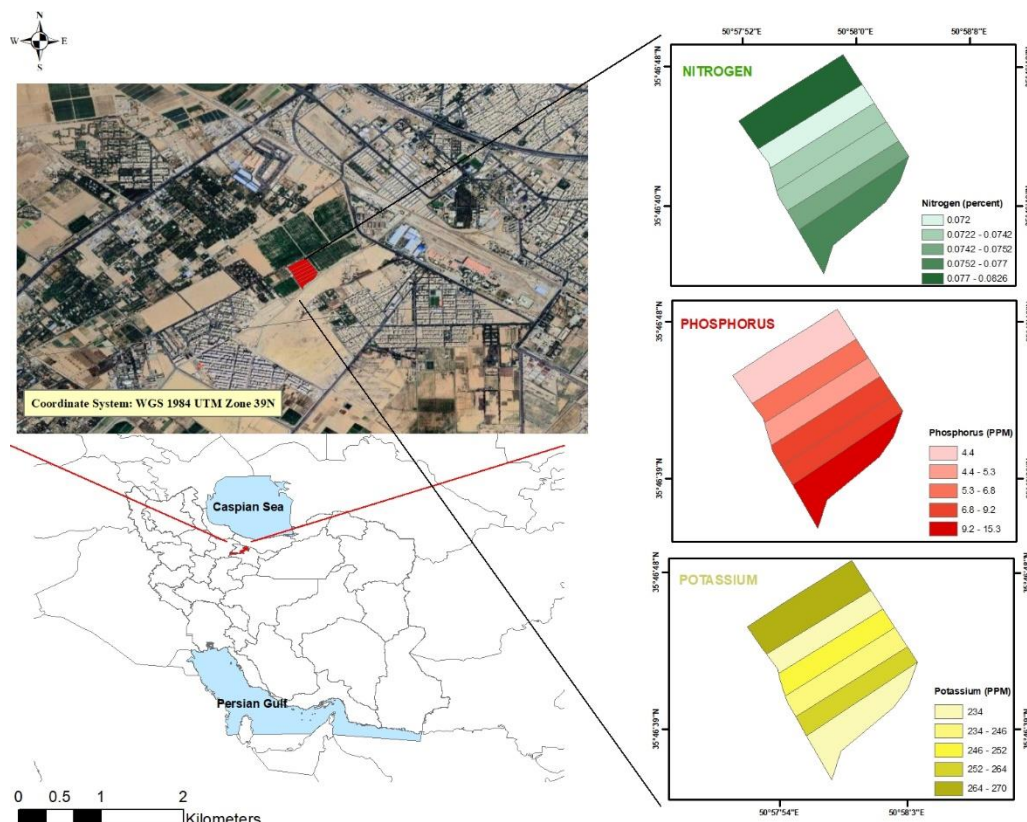
مواد و روش‌ها

جمع‌آوری داده‌ها و منطقه مطالعه

این مطالعه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در استان البرز، شهرستان کرج، ایران، در مزرعه تحقیقاتی شرکت توسعه خدمات مهندسی آب و خاک پارس انجام شد. مزرعه تحقیقاتی شامل ۶ هکتار از مجموع ۱۰۰ هکتار زمین کشاورزی است. شهرستان کرج، واقع در استان البرز، با ارتفاع ۱۳۲۰ متر بالاتر از سطح دریا و بارش سالانه متوسط ۲۵۰ میلی‌متر، دارای اقلیم نیمه‌مرطوب می‌باشد (شکل ۱) (Ministry of jihad-e-agri, 2021). داده‌های این مطالعه از طریق یک بررسی میدانی در سطح ۶ هکتار جمع‌آوری شد. تمام مراحل کاشت، داشت و برداشت گندم بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد موسسه ثبت و صدور گواهینامه بذر و گیاه انجام شد.

(Moghadam, 2023). بهبود کارایی انرژی علاوه بر صرفه‌جویی مالی، موجب حفظ سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی هوا می‌شود (Kaab, Khanali, Shadamanfar, & Jalalvand, 2024). گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نیز برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت هوا ضروری است (Saadi, Behnia, Taki, & Kaab, 2025). در مقابل، مصرف بیش از حد نهاده‌هایی مانند کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و سوخت‌های فسیلی، سبب تشدید گرمایش جهانی، کاهش تنوع زیستی و تخریب خاک و هوا می‌شود؛ از این رو، مدیریت صحیح نهاده‌ها برای حفظ منابع طبیعی حیاتی است (Mostashari-Rad et al., 2021). انتشار ناشی از انرژی حدود دو سوم گازهای گلخانه‌ای جهانی را شامل می‌شود که بخش کشاورزی سهمی معادل ۱۰ تا ۱۲ درصد دارد (Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Mohammadkashi, Chau, & Mostashari-Rad, 2022). در کشت گندم آبی نیز، مصرف کودهای نیتروژن و فسفر مهم‌ترین عامل افزایش آلودگی محیط‌زیست شناخته شده است (Taherzadeh-Shalmai, Sharifi, Ghasemi-Mobtaker, & Kaab, 2021).

استفاده گسترده از کودها و علف‌کش‌ها در کشاورزی مدرن، هرچند موجب افزایش عملکرد محصولات می‌شود، اما پیامدهای منفی قابل توجهی بر محیط‌زیست و سلامت انسان دارد. کشاورزی دقیق با تکیه بر فناوری‌های نوین، راهکاری مؤثر برای بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها، کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش بهره‌وری ارائه می‌دهد. مطالعه حاضر با شبیه‌سازی VRT و تحلیل هم‌زمان اثرات انرژی و انتشار آلاینده‌ها، نوآوری خود را در ارائه داده‌های عملی و کاربردی برای بهبود پایداری کشاورزی نشان می‌دهد. این رویکرد



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه، مزرعه زراعی و ویژگی‌های خاک در مزرعه گندم به مساحت ۶ هکتار

Fig.1. Study region, agricultural field, and soil characteristics in the 6-hectare wheat cultivation area

روش نرخ متغیر (Variable Rate Technology- VRT)

مصرف نهاده‌ها

این سیستم مبتنی بر فناوری مکانیزه است که نرخ کاربرد علف‌کش‌ها و کودهای شیمیایی را به‌طور اختصاصی برای هر موقعیت مکانی با استفاده از نقشه‌های مکانی تهیه‌شده تنظیم می‌کند. نقشه‌های پراکنش مکانی علف‌های هرز و کودهای شیمیایی در سطح ۶ هکتار با استفاده از پهپادی مجهز به حسگرهای چندطیفی و همچنین آزمایش‌های میدانی خاک تهیه شد. با این حال، به دلیل نبود تجهیزات لازم برای اجرای عملیات پاشش و کوددهی با نرخ متغیر در مزرعه، تمامی برآوردها برای این رویکرد بر اساس شرایط شبیه‌سازی شده انجام شد. بنابراین، مزرعه تحقیقاتی فعلی با روش متداول مدیریت می‌شود و عملکرد به‌دست‌آمده در هر دو رویکرد یکسان است؛ با این حال، داده‌های ورودی برای سیستم محاسباتی، مصرف نهاده‌ها را بر اساس شبیه‌سازی فناوری نرخ متغیر محاسبه می‌کند (جدول ۱).

رویکردهای پژوهش

در این مطالعه، دو سامانه مصرف نهاده‌های شیمیایی بررسی شد:

روش متداول مصرف نهاده‌های شیمیایی

این روش شامل استفاده از کودهای فسفر، پتاسیم و نیتروژن به‌همراه علف‌کش شیمیایی برای گندم، مطابق با شیوه‌های سنتی منطقه و بر اساس توصیه‌های فنی کاشت و میزان علف‌کش به‌صورت یکنواخت در کل سطح در هر هکتار است. در این رویکرد، در طول دوره رشد گندم، به‌ازای هر هکتار ۲۰۷ کیلوگرم نیتروژن، ۶۹ کیلوگرم فسفات و ۵۰ کیلوگرم پتاسیم با توزیع یکنواخت در مزرعه مصرف می‌شود. همچنین، ترکیبی از علف‌کش‌های Oxial One (Syngenta) و Bazagran DP (BASF) به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار استفاده می‌شود. این الگوی مصرف مطابق با روش مرسوم منطقه است و علف‌کش‌ها در ۱۰۰ درصد سطح مزرعه اعمال می‌شوند.

جدول ۱- نهاده‌های مصرفی در کشت گندم تحت دو رویکرد مدیریت نهاده شامل روش مرسوم و نرخ متغیر

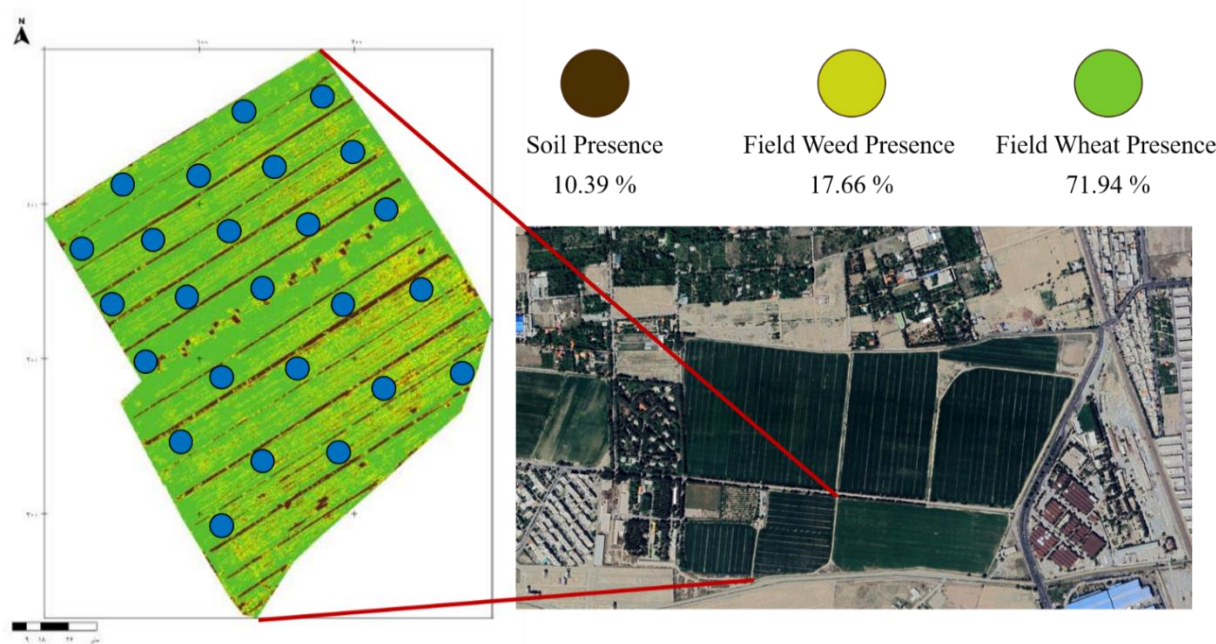
Table 1- Inputs used in wheat cultivation under conventional and variable rate (VRT) input management systems

ورودی Input	واحد Unit	روش نرخ متغیر VRT (6 ha ⁻¹)	روش مرسوم Non- VRT (6 ha ⁻¹)	ضرایب معادل Coefficient equivalent (MJ unit ⁻¹)	منابع Reference
نیروی انسانی Human labor	h ha ⁻¹	511	551	1.96	(Kaab <i>et al.</i> , 2019a)
ماشین‌ها Machinery	h ha ⁻¹	31.5	39.5	62.70	(Ghasemi-Mobtaker <i>et al.</i> , 2020)
سوخت دیزل Diesel fuel	L ha ⁻¹	510	585	56.31	(Saber <i>et al.</i> , 2021)
نیتروژن Nitrogen	kg ha ⁻¹	966	1242	66.14	(Nabavi-Pelesaraei, Rafiee, Hosseinzadeh-Bandbafha, & Shamshirband, 2016)
فسفات Phosphate	kg ha ⁻¹	253	414	12.44	(Basavalingaiah <i>et al.</i> , 2020)
پتاسیم Potassium	kg ha ⁻¹	75	300	11.15	(Rostami, Azizpanah, Fathi, & Taki, 2025)
ریزمغذی‌ها Micronutrients	kg ha ⁻¹	15	15	120	(Hesampour, Hassani, Hanafiah, & Heidarbeigi, 2022)
علف‌کش Herbicide	L ha ⁻¹	2.64	15	85	(Ghasemi-Mobtaker, Ataiee, Akram, & Kaab, 2024)
حشره‌کش Insecticide	L ha ⁻¹	0.45	0.45	199	(Ozkan, Akcaoz, & Fert, 2004)
قارچ‌کش Fungicide	L ha ⁻¹	0	0	92	(Kaab, Ghasemi-Mobtaker, & Sharifi, 2023)
بذر Seed	kg ha ⁻¹	1500	1500	20.01	(Dekamin, Kheiralipour, & Afshar, 2022)
خروجی Output	kg ha ⁻¹	34800	34800	–	

نقشه پراکنش و تراکم علف‌های هرز

برای شناسایی علف‌های هرز در مزرعه گندم، از پهپاد چندطیفی DJI Phantom 4 ساخت چین مجهز به دوربین‌های Parrot SEQUOIA+ استفاده شد. تصاویر سنجش از دور در تاریخ ۱۴ مارس ۲۰۲۳ از مزرعه گندم و با ارتفاع پرواز ۵۰ متر ثبت شدند. این تصاویر با وضوح مکانی بالا و پوشش طیفی گسترده، به‌ویژه در نواحی مرئی (قرمز، سبز، آبی) و مادون‌قرمز نزدیک (NIR) تهیه شدند. پهپادها نسبت به سایر پلتفرم‌های سنجش از دور، با قابلیت پرواز در ارتفاع پایین، ثبت تصاویر با رزولوشن میلی‌متری و ارائه داده‌ها در لحظات حساس متمایز می‌شوند. علاوه بر این، پهپادها نسبت به وسایل نقلیه زمینی بدون سرنشین (UGV) زمان کمتری برای پایش یا بازدید مزارع نیاز دارند و در حضور موانع طبیعی، مانورپذیری بهتری

ارائه می‌دهند که در عملیات بین ردیف‌های محصولات اهمیت دارد (Monteiro & Santos, 2022). تمام مراحل تصویربرداری، پردازش تصاویر و تحلیل‌های فنی توسط شرکت آسمان سرخ آدینه انجام شد. مزرعه انتخاب‌شده، شامل سطح ۶ هکتاری، در مزرعه تحقیقاتی شرکت خدمات مهندسی آب و خاک پارس واقع شده است و مختصات جغرافیایی آن ۴۶°۳۵'۴۲" شمالی و ۵۷°۵۰'۵۹" شرقی است. منطقه مطالعه شامل بخش‌های مختلف محصول و علف‌های هرز با تراکم‌ها و گونه‌های متفاوت بود (شکل ۲). بر اساس درصد حضور علف‌های هرز در مزرعه (۱۷/۶۶ درصد)، در رویکرد کاربرد علف‌کش با نرخ متغیر، همین درصد از سطح مزرعه تحت پوشش قرار گرفت.



شکل ۲- میزان آلودگی علف‌های هرز در مدیریت نرخ متغیر در مزرعه گندم و نقاط نمونه‌برداری ترکیبی خاک
Fig. 2. Weed infestation levels under variable rate management in the wheat field, and locations of composite soil sampling points (blue dots)

قابل‌دسترس (P)، پتاسیم قابل‌دسترس (K)، بافت خاک، هدایت الکتریکی و pH خمیر اشیاع خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. بر اساس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک، نقشه‌های پراکنش مکانی N، P و K تهیه شد تا اجرای روش VRT و مدیریت دقیق‌تر حاصلخیزی خاک امکان‌پذیر گردد. در رویکرد VRT، نرخ کوددهی مطابق با نیاز واقعی گندم تنظیم شد که منجر به مصرف ۷۷/۷۸ درصد نیتروژن، ۶۱/۱۱ درصد فسفر و ۲۳ درصد پتاسیم نسبت به روش متداول شد (شکل ۱).

روش‌شناسی ارزیابی چرخه زندگی (LCA)

رویکرد LCA، که به آن تحلیل تعادل زیستی یا گهواره تا گور نیز گفته می‌شود، اثرات زیست‌محیطی مرتبط با هر مرحله از چرخه عمر محصول را شامل استخراج مواد خام، پردازش، تولید، حمل‌ونقل، مصرف، نگهداری و دفع یا بازیافت نهایی بررسی می‌کند LCA به طراحان کمک می‌کند تا اثرات زیست‌محیطی محصولات خود را ارزیابی و بهینه‌سازی کنند و از تمرکز محدود بر مسائل منفرد زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند (Khanali, Salehpour, Rajabipour, & Kaab, 2025). در این مطالعه، تعریف هدف و محدوده شامل واحد عملکردی، مرزهای سیستم، توزیع منابع و تأثیر انتخاب بخش‌ها است (Kaab, Sharifi, & Moradi, 2021). انتخاب مرز سیستم اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا چالش‌های

برای اطمینان از پوشش طیفی مناسب و جامع، تصاویر در مرحله افزایش طول ساقه گندم و پیش از کنترل شیمیایی علف‌های هرز ثبت شدند. برای ارزیابی دقت شناسایی علف‌های هرز، داده‌های میدانی و نمونه‌های زمینی جمع‌آوری شده در همان تاریخ‌ها استفاده شد. علف‌های هرز مشاهده‌شده شامل یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*)، جو وحشی (*Hordeum spontaneum*)، علف‌های دم‌موشی (*Setaria viridis*)، و علف‌های پهن‌برگ شامل ارشته خطایی (*Lepyrrodiclis holosteoides*)، خردل وحشی (*Sinapis arvensis*)، کیسه کشیش (*Capsella bursa-pastoris*)، سبزاب ایرانی (*Veronica persica*)، و سلمه تره (*Chenopodium album*) بودند.

نمونه‌برداری و تحلیل خاک

نمونه‌برداری خاک در کل مساحت ۶ هکتاری با روش تصادفی-سیستماتیک انجام شد تا پوشش یکنواخت و نماینده‌ای از مزرعه حاصل شود. برای هر هکتار، پنج نمونه ترکیبی جمع‌آوری شد. هر نمونه ترکیبی از ادغام ۲۰-۱۵ نمونه جزئی جمع‌آوری شده به‌صورت تصادفی در الگوی زیگزاگ تهیه شد. وزن هر نمونه ترکیبی حدود ۱-۱/۵ کیلوگرم بود. نمونه‌ها از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر، هم پیش از کاشت گندم و هم پس از برداشت محصول قبلی (ذرت علوفه‌ای) جمع‌آوری شدند. نمونه‌ها برای تعیین نیتروژن کل (N)، فسفر

استفاده قرار گرفتند (Kaab, Sharifi, Mobli, Nabavi-Pelesaraei, & Chau, 2019b) (جدول ۲). این شاخص‌ها بر اساس واحد عملکردی ۶ هکتار استاندارد شدند تا مقایسه‌ای عادلانه بین سیستم‌های کشت فراهم گردد.

زیست‌محیطی مرتبط با سیستم‌های کشاورزی حتی پس از برداشت نیز ادامه دارند (Nejad, Almassi, & Ghahderijani, 2023). مرز سیستم این مطالعه مربوط به کشت گندم در یک قطعه شش‌هکتاری است، که تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های داخل آن بررسی می‌شوند. واحد عملکردی در این مطالعه تولید گندم در مساحت ۶ هکتار است و آلاینده‌های زیست‌محیطی بر اساس ورودی‌های مصرف‌شده برای تولید محصول محاسبه می‌شوند (Azizpanah, Fathi, & Taki, 2023). تحلیل نتایج در این مرحله، منابع مصرف‌شده و انتشار آلاینده‌ها در کل یا بخشی از چرخه عمر تولید گندم مورد بررسی قرار گرفت. منابع ورودی شامل نیروی کار، دیزل، کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، بذر و ماشین‌آلات بود. خروجی سیستم محصول گندم شامل دانه و کاه است. سیستم تولید با دو رویکرد تحلیل شد: نرخ متغیر و روش مرسوم منطقه‌ای.

هزینه اجتماعی کربن

این شاخص نمایانگر هزینه اقتصادی ناشی از انتشار هر تن اضافی CO₂ معادل است و به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی اثرات اجتماعی و اقتصادی کاهش یا افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته خواهد شد. مقادیر SCC^۱ برای گازهای مورد مطالعه بر اساس میانگین بین‌المللی و مطالعات ایران اعمال شد. هزینه اجتماعی کل گازهای گلخانه‌ای برای هر رویکرد با استفاده از رابطه شماره ۱ محاسبه خواهد شد (Wang et al., 2019):

$$SCC_{total} = \sum_i (E_i \times SCC_i) \quad (1)$$

که در آن E_i : میزان انتشار گاز هر آلاینده بر حسب کیلوگرم CO₂ معادل در هر هکتار ($\text{kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$)، SCC_i : هزینه اجتماعی هر واحد انتشار بر حسب دلار بر تن CO₂-معادل ($\text{USD t}^{-1} \text{CO}_2$)، SCC_{total} : هزینه اجتماعی کل گازهای گلخانه‌ای بر حسب دلار بر هکتار (USD ha^{-1}) خواهد بود.

ورودی و خروجی انرژی

ورودی‌های انرژی شامل نیروی کار، سوخت دیزل، کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها، بذر و ماشین‌آلات کشاورزی بودند. انرژی خروجی از محصول گندم شامل دانه و بقایای کاه و کالاله حاصل می‌شود. برای تبدیل دقیق این ورودی‌ها و خروجی‌ها به واحدهای انرژی قابل‌مقایسه، از ضرایب معادل انرژی استفاده شد (جدول ۱). ارزیابی مصرف و تولید انرژی در تولید گندم با دو رویکرد نرخ متغیر و غیرمتغیر انجام شد. چند شاخص کلیدی انرژی شامل نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی، شدت انرژی و خالص انرژی به‌دست‌آمده مورد

1- Social cost of carbon

جدول ۲- شاخص‌های انرژی در کشت گندم تحت دو رویکرد مدیریت نهاده شامل روش مرسوم و نرخ متغیر

Table 2- Energy indicators of wheat cultivation under conventional and variable rate (VRT) input management systems

شاخص Index	واحد Unit	رابطه Equation
نسبت انرژی Energy Ratio	-	$Total\ output\ energy / Total\ input\ energy$
بهره‌وری انرژی Energy Productivity	kg MJ ⁻¹	$Wheat\ yield / Total\ input\ energy$
شدت انرژی Specific Energy	MJ kg ⁻¹	$Total\ input\ energy / Wheat\ yield$
افزوده خالص انرژی Net Energy Gain	MJ ha ⁻¹	$Total\ output\ energy - Total\ input\ energy$

نرم افزارهای مورد استفاده

در این مطالعه جهت ارزیابی اثرات زیست محیطی و شاخص گرمایش جهانی از روش ReCiPe2016 و نرم افزار SimaPro V9.6 استفاده شد (Huijbregts et al., 2017). همچنین جهت ترسیم نقشه‌های حاصلخیزی خاک از نرم افزار Arc Gis V10.4 استفاده شد. به منظور پردازش تصاویر سنجنده چندطیفی پهنادی از نرم افزار ENVI 5.3 استفاده شد.

نتایج

ارزیابی شاخص گرمایش جهانی و آلایندها به به هوا، آب و خاک

ارزیابی اثرات زیست محیطی شاخص گرمایش جهانی بر اساس روش ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) برای کشت گندم زمستانه تحت شرایط آبیاری در یک قطعه شش هکتاری در کرج، ایران، نشان داد شاخص گرمایش جهانی (Global Warming Potential – GWP) برای رویکرد کاربرد نرخ متغیر (VRA) در تولید گندم، برای تولید کل ۳۴/۸۰۰ کیلوگرم گندم، ۱۷/۶۹۱ کیلوگرم معادل CO₂ برآورد شد (شکل ۳). از میان منابع مختلف، انتشار مستقیم ناشی از کاربرد نرخ متغیر با ۸/۶۰۳ کیلوگرم معادل CO₂، تقریباً ۴۹ درصد از کل GWP را تشکیل می‌دهد. مصرف کود نیتروژن دومین منبع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای بود که ۶/۸۹۲ کیلوگرم CO₂ معادل سهم داشت و نقش مهمی در افزایش گرمایش جهانی ایفا می‌کند. سایر منابع شامل بذر و سوخت دیزل ماشین‌آلات به ترتیب با ۱/۱۵۷ و ۳۹۰ کیلوگرم CO₂ معادل، سهم قابل توجهی دارند، در حالی که نقش ماشین‌آلات، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌ها نسبتاً کمتر است. قابل توجه است که در این رویکرد، علف کش و حشره کش هیچ سهمی در GWP ندارند که نشان دهنده کاهش مصرف یا بهینه‌سازی کاربرد این نهاده‌هاست. شاخص گرمایش جهانی در رویکرد روش مرسوم یا بدون نرخ متغیر

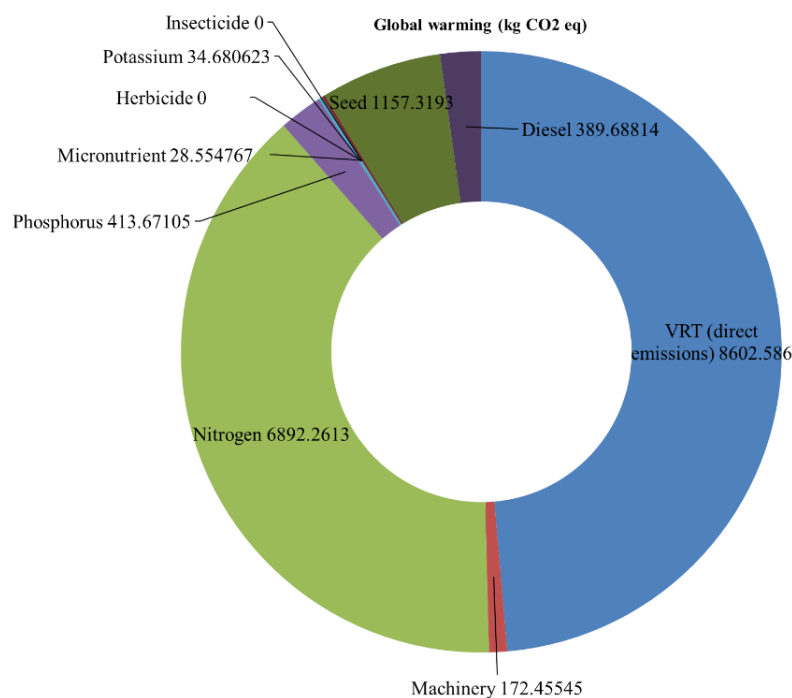
(N-VRT) برای تولید ۳۴/۸۰۰ کیلوگرم گندم، برابر با ۲۲۲۰۲/۷۴ کیلوگرم معادل CO₂ برآورد شد (شکل ۳). بیشترین سهم انتشار ناشی می‌شود که تقریباً نیمی از کل GWP را تشکیل می‌دهد. همچنین، کود نیتروژن با ۸۸۶۱/۴۸ کیلوگرم CO₂ معادل دومین منبع مهم گرمایش جهانی محسوب می‌شود. سایر منابع شامل فسفر (۶۷۶/۹۲ kg CO₂ eq)، پتاسیم (۱۵۰/۷۹ kg CO₂ eq)، بذر (۱۱۵۷/۳۲ kg CO₂ eq) و سوخت دیزل (۴۴۷ kg CO₂ eq) هستند که هر کدام سهمی جزئی اما قابل توجه در کل انتشار دارند، در حالی که ماشین‌آلات (۲۱۶/۲۵ kg CO₂ eq) و ریزمغذی‌ها (۲۸/۵۵ kg CO₂ eq) تأثیر نسبتاً محدودی بر GWP دارند. همچنین، علف کش و حشره کش در این رویکرد سهمی ندارند که بیانگر کاهش یا بهینه‌سازی مصرف آن‌هاست (شکل ۳).

در مقایسه شاخص گرمایش جهانی بین دو رویکرد روش مرسوم یا بدون نرخ متغیر (Non-VRT) و روش نرخ متغیر (VRA)، تفاوت قابل توجهی مشاهده می‌شود. مقدار کل GWP برای رویکرد مرسوم ۲۲۲۰۲/۷۴ کیلوگرم معادل CO₂ است، در حالی که در رویکرد نرخ متغیر این عدد به ۱۷۶۹۱/۲۱ کیلوگرم معادل CO₂ کاهش یافته است (شکل ۳). این کاهش نشان دهنده صرفه‌جویی حدود ۴/۵۱۲ کیلوگرم CO₂ معادل، معادل کاهش تقریبی ۲۰ درصد در انتشار گازهای گلخانه‌ای است. تحلیل منابع نشان می‌دهد که در روش VRA، مصرف بهینه کود نیتروژن و کاهش انتشار مستقیم مزرعه‌ای اصلی‌ترین دلایل کاهش GWP هستند، در حالی که در رویکرد مرسوم، انتشار مستقیم و مصرف نیتروژن سهم بالاتری از گرمایش جهانی دارند. این مقایسه نشان می‌دهد که به کارگیری فناوری نرخ متغیر در تولید گندم می‌تواند به طور مؤثری اثرات گرمایش جهانی را کاهش داده و پایداری زیست محیطی را بهبود بخشد.

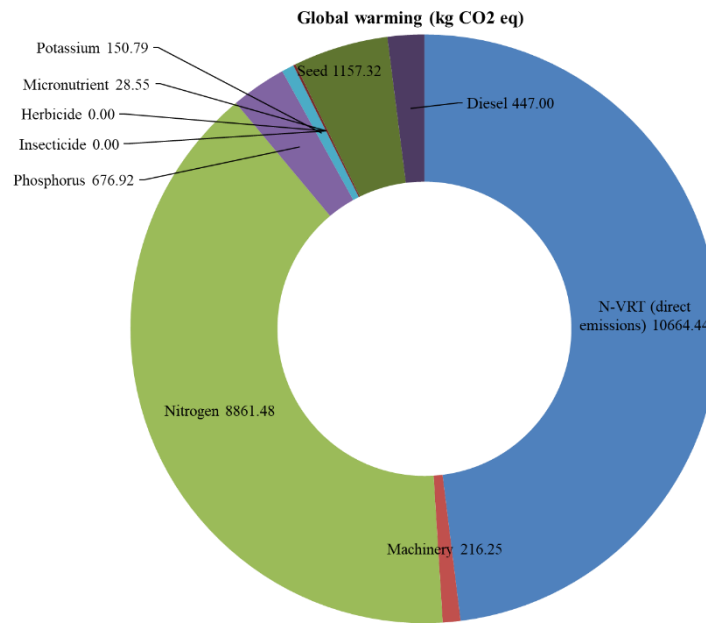
نتایج نشان داد که استفاده از روش نرخ متغیر (VRT) در تولید گندم، منجر به کاهش قابل توجه انتشار آلایندها نسبت به روش مرسوم (Non-VRT) شد. در بخش انتشار به هوا، مقدار دی‌اکسید

هکتار (۳۸/۹ درصد کاهش) شد، که بیانگر بهبود کیفیت منابع آبی و کاهش اثرات تغذیه بیش از حد است. همچنین در بخش انتشار به خاک، تمام فلزات سنگین آلاینده از جمله Cr، Ni، Pb، Zn، Cu، Cd و Hg در رویکرد VRT کاهش قابل توجهی داشتند؛ برای مثال انتشار Pb از ۶۷۸۲/۱۸۴ به ۵۲۶۴۱۶۸/۵ میلی گرم (۴۶ درصد کاهش) و Zn از ۱۰۵۳/۱۶۸ به ۶۸۴۹۹۴/۵ میلی گرم (۳۵ درصد کاهش) کاهش یافت. فلزات کم‌اثرتر مانند Mo و Mn، B، Fe تغییر قابل توجهی نشان ندادند (جدول ۳).

کربن از ۴/۸۲۰ به ۴/۰۴۰ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت که معادل کاهش حدود ۱۶/۲ درصد است. انتشار NH_3 و N_2O نیز به ترتیب از ۱۹/۶ و ۱۵۱ به ۱۵/۳ و ۱۱۷ کیلوگرم در هکتار کاهش یافت، که نشان‌دهنده کاهش ۲۱/۹ درصد و ۲۲/۵ درصد است (جدول ۳). سایر آلاینده‌های هوا شامل CO ، NO_x ، $\text{PM}_{2.5}$ ، HC و SO_2 نیز کاهش قابل توجهی بین ۱۲ تا ۲۱ درصد را نشان دادند. در بخش انتشار به آب، استفاده از VRT باعث کاهش نیترات از ۱۶۵ به ۱۲۸ کیلوگرم در هکتار (۲۲/۴ درصد کاهش) و فسفر از ۹/۰۴ به ۵/۵۲ کیلوگرم در



الف a



ب

شکل ۳- سهم نهاده‌ها در شاخص گرمایش جهانی در شرایط مزرعه با دو رویکرد (الف) VRT و (ب) N-VRT
Fig. 3. Contribution of inputs to the Global Warming Potential in field conditions under (a) VRT and (b) N-VRT scenarios

جدول ۳- انتشار آلاینده‌ها در شرایط مزرعه‌ای تحت دو رویکرد کشت با نرخ متغیر (VRT) و توزیع یکنواخت (N-VRT) به هوا، آب و خاک
Table 3- Emissions to air, water, and soil from wheat production under conventional (N-VRT) and variable rate (VRT) systems in field conditions

انتشار به هوا Emission to Air	واحد Unit	رویش نرخ متغیر VRT (ha ⁻¹)	رویش مرسوم Non-VRT (ha ⁻¹)
کربن دی‌اکسید Carbon dioxide (CO ₂)	kg ha ⁻¹	4.04E+03	4.82E+03
اکسیدهای نیتروژن Nitrogen oxides (NO _x)	kg ha ⁻¹	2.33E+02	2.96E+02
مونواکسید کربن Carbon monoxide (CO)	kg ha ⁻¹	4.31E+00	4.94E+00
ذرات معلق Particulates (b2.5 μm)	kg ha ⁻¹	3.07E+00	3.52E+00
هیدروکربن‌ها Hydro carbons (HC, as NMVOC)	kg ha ⁻¹	1.95E+00	2.24E+00
دی‌اکسید گوگرد Sulfur dioxide (SO ₂)	kg ha ⁻¹	6.92E-01	7.94E-01
متان Methane (CH ₄)	kg ha ⁻¹	8.85E-02	1.01E-01
دی‌نیتروژن مونواکسید Dinitrogen monoxide (N ₂ O)	kg ha ⁻¹	1.53E+01	1.96E+01
آمونیاک Ammonia (NH ₃)	kg ha ⁻¹	1.17E+02	1.51E+02
بنزن Benzene	kg ha ⁻¹	5.00E-03	5.73E-03
انتشار به آب Emission to Water			

نیترات Nitrate	kg ha ⁻¹	1.28E+02	1.65E+02
فسفر Phosphorus	kg ha ⁻¹	5.52E+00	9.04E+00
انتشار به خاک Emission to Soil			
کادیوم Cd (Cadmium)	mg	28707.50	44979.00
مس Cu (copper)	mg	80539.50	123000.00
روی Zn (Zinc)	mg	684994.50	1053168.00
سرب Pb (lead)	mg	5264168.50	6782184.00
نیکل Ni (Nickel)	mg	71632.90	110935.80
کروم Cr (chromium)	mg	391023.90	615331.80
جیوه Hg (Mercury)	mg	281.20	444.00
آهن Fe (Iron)	mg	1500.00	1500.00
بور B (Boron)	mg	150.00	150.00
منگنز Mn (Manganese)	mg	1530.00	1530.00
مولیبدن Mo (Molybdenum)	mg	1500.00	1500.00

شاخص هزینه اجتماعی آلاینده‌ها

بررسی میزان هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌های ناشی از فرآیند تولید در هر دو رویکرد نرخ متغیر و توزیع یکنواخت نهاده‌ها به روش مرسوم نشان داد که به ترتیب اکسید نیتروژن (NO_x)، دی‌نیتروژن مونواکسید (N₂O) و کربن دی‌اکسید (CO₂) بیشتر هزینه‌ی اجتماعی را به‌خود اختصاص داده‌اند (جدول ۴). کمترین هزینه اجتماعی

تحمیل شده نیز در هر دو رویکرد مختص به آلاینده محیطی متان (CH₄) می‌باشد. به‌طور کلی میزان هزینه اجتماعی در رویکرد نرخ متغیر کمتر از روش مرسوم می‌باشد، به‌طوری‌که کل هزینه اجتماعی نرخ متغیر مصرف نهاده‌ها ۲۵۲/۳۷ دلار به‌ازای ۶ هکتار مزرعه مورد بررسی بود که این میزان نسبت به ۳۱۷/۹۷ دلار به‌ازای ۶ هکتار روش مرسوم در حدود ۲۰/۶۳ درصد کمتر بود (جدول ۴).

جدول ۴- هزینه اجتماعی انتشار آلاینده‌های تولیدی در روش مرسوم و روش نرخ متغیر

Table 4- Social Cost of Emission under conventional and variable rate input management systems

شاخص Index	ضریب هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها ESC Coefficient (\$ Unit ⁻¹)	روش مرسوم Non-VRT (ha ⁻¹)	روش نرخ متغیر VRT (ha ⁻¹)	هزینه اجتماعی روش مرسوم Non-VRT ESC (\$ 6ha ⁻¹)	هزینه اجتماعی روش نرخ متغیر VRT ESC (\$ 6ha ⁻¹)
کربن دی‌اکسید Carbon dioxide (CO ₂)	0.01	4.82E+03	4.04E+03	48.2	40.4
اکسیدهای نیتروژن Nitrogen oxides (NO _x)	0.6	2.96E+02	2.33E+02	177.6	139.8

مونواکسید کربن Carbon monoxide (CO)	0.19	4.94E+00	4.31E+00	0.9386	0.8189
دی‌اکسید گوگرد Sulfur dioxide (SO ₂)	1.82	7.94E-01	6.92E-01	1.44508	1.25944
متان Methane (CH ₄)	0.21	1.01E-01	8.85E-02	0.02121	0.018585
دی‌نیتروژن مونواکسید Dinitrogen monoxide (N ₂ O)	4.58	1.96E+01	1.53E+01	89.768	70.074
هزینه اجتماعی کل گازهای گلخانه‌ای SCC Total	-	-	-	317.97289	252.370925

شاخص‌های انرژی و سهم انرژی نهاده‌ها

روش فناوری نرخ متغیر (VRT) برای مدیریت مصرف نهاده‌های شیمیایی در تولید گندم، منجر به مصرف کل انرژی ورودی معادل ۱۳۱۶۳۱/۵۷ مگاژول شد. از این مقدار، ۲۹۷۱۹/۶۶ مگاژول به انرژی مستقیم (نیروی انسانی و سوخت دیزل) و ۱۰۱۹۱۱/۹۱ مگاژول به انرژی غیرمستقیم (مربوط به تولید نهاده‌هایی همچون کودها و آفت‌کش‌ها) اختصاص یافت (جدول ۵). مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر به ترتیب برابر با ۳۱۰۱۶/۵۶ مگاژول و ۱۰۰۶۱۵/۰۱ مگاژول محاسبه شد. کل انرژی خروجی این سیستم نیز برابر با ۸۹۷۳۳۷/۳۳ مگاژول برآورد شد. ارزیابی شاخص‌های انرژی در این رویکرد مدیریتی نشان داد که نسبت انرژی ۶/۸۲ بهره‌وری انرژی ۰/۲۶۴ کیلوگرم بر مگاژول و شدت انرژی ۳/۷۸ مگاژول بر کیلوگرم است. همچنین، خالص انرژی به دست آمده در این روش برابر با ۷۶۵۷۰۵/۷۶ مگاژول محاسبه شد (جدول ۵).

در سیستم مدیریت متداول مصرف نهاده‌های شیمیایی، مصرف کل انرژی ورودی به ۱۶۰۳۱۸/۵۵ مگاژول رسید. از این مقدار، ۳۴۰۲۱/۳۱ مگاژول به انرژی مستقیم و ۱۲۶۲۹۷/۲۴ مگاژول به انرژی غیرمستقیم تعلق داشت (جدول ۵). مصرف انرژی تجدیدپذیر برابر با ۳۱۰۹۴/۹۶ مگاژول و انرژی غیرتجدیدپذیر ۱۲۹۲۲۳/۵۹ مگاژول بود.

مگاژول بود. کل انرژی خروجی این سیستم ۸۹۷۳۳۷/۳۳ مگاژول گزارش شد. شاخص‌های عملکرد انرژی برای این رویکرد به شرح زیر بودند: نسبت انرژی ۵/۵۹، بهره‌وری انرژی ۰/۲۱۷ کیلوگرم بر مگاژول و شدت انرژی ۴/۶۰ مگاژول بر کیلوگرم. خالص انرژی این سیستم برابر با ۷۳۷۰۱۸/۷۸ مگاژول محاسبه شد (جدول ۵). تحلیل شاخص‌های انرژی نشان داد که تمامی معیارهای مرتبط با انرژی در سیستم فناوری نرخ متغیر (VRT) نسبت به روش متداول بهبود یافته‌اند. به عنوان مثال، نسبت انرژی و بهره‌وری انرژی در رویکرد VRT به ترتیب ۲۱/۷۹ درصد بیشتر از مقادیر مشاهده شده در مدیریت متداول بود. علاوه بر این، شدت انرژی در روش VRT معادل ۱۷/۸۹ مگاژول بر کیلوگرم بود که نشان دهنده مصرف کمتر انرژی به ازای هر واحد محصول است. مصرف انرژی مستقیم و غیرمستقیم در سیستم VRT نیز به ترتیب ۱۲/۶۴ مگاژول و ۱۹/۳۱ مگاژول کمتر از سیستم متداول بود (جدول ۵). روند کاهشی مشابهی در سایر شاخص‌های انرژی مشاهده شد. به طور کلی، این اعداد کاهش قابل توجهی در ورودی‌های انرژی و بهبود کارایی انرژی را در هنگام استفاده از نهاده‌های شیمیایی با استراتژی نرخ متغیر نسبت به کاربرد یکنواخت نشان می‌دهند.

جدول ۵- شاخص‌های انرژی در کشت گندم تحت دو سیستم مدیریت نهاده شامل روش مرسوم و روش نرخ متغیر

Table 5-Energy indicators of wheat cultivation under conventional and variable rate input management systems.

شاخص Index	روش مرسوم Non-VRT (MJ 6 ha ⁻¹)	روش نرخ متغیر VRT (MJ 6 ha ⁻¹)	نسبت (روش نرخ متغیر به روش مرسوم) Ratio (VRT vs N-VRT)
نسبت انرژی Energy Ratio	5.59	6.81	21.79
بهره‌وری انرژی Energy Productivity (kg MJ ⁻¹)	0.21	0.26	21.79
شدت انرژی Specific Energy (MJ kg ⁻¹)	4.60	3.78	-17.9
افزوده خالص انرژی Net Energy Gain (MJ ha ⁻¹)	737018.78	765705.76	3.892

انرژی مستقیم	34021.31	29719.66	-12.6
Direct Energy			
انرژی غیرمستقیم	126297.24	101911.91	-19.3
Indirect Energy			
انرژی تجدیدپذیر	31094.96	31016.56	-0.25
Renewable Energy			
انرژی غیرتجدیدپذیر	129223.59	100615.01	-22.1
Non-renewable Energy			
کل انرژی ورودی	160318.55	131631.57	-17.9
Total Energy Input			
کل انرژی خروجی	897337.33	897337.33	-
Total Energy Output			

زیست‌محیطی را تضمین کند.

بحث

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که VRT مبتنی بر نقشه‌های هوایی تهیه‌شده توسط پهپادهای مجهز به دوربین‌های چندطیفی قادر به شناسایی علف‌های هرز می‌تواند مصرف نهاده‌های شیمیایی را کاهش داده و کارایی آن‌ها را افزایش دهد، که در نهایت به کاهش انرژی مصرفی منجر می‌شود (Meesaragandla et al., 2024). به‌عنوان نمونه، نقشه‌برداری با پهپاد از *Cirsium arvense* در مزارع گندم و جو باعث کاهش ۵۰ درصدی مصرف علف‌کش‌ها شد (Esposito et al., 2021). مطالعات دیگر نشان داده‌اند که استفاده از پهپاد برای کنترل مورچه‌خوار ساقه شکر می‌تواند مصرف آفت‌کش را تا ۹۰ درصد کاهش داده و کارایی سمپاشی را تا ۱۴ برابر افزایش دهد (Zhang et al., 2019). همچنین، پهپادهای مورد استفاده برای نقشه‌برداری علف‌های هرز و اعمال علف‌کش‌ها می‌توانند ۰/۳ تا ۳ برابر کاراتر از روش‌های متداول باشند (Hunter, Gannon, Richardson, 2020). یکی از راهکارهای مؤثر بهینه‌سازی، استفاده از سنجش از دور برای پایش علف‌های هرز و ارزیابی حاصلخیزی خاک است (Roslim et al., 2021).

با وجود تأثیر مثبت فناوری نرخ متغیر (VRT) در کاهش مصرف نهاده‌ها و انتشار آلاینده‌ها، پیاده‌سازی عملی آن با محدودیت‌های قابل توجهی مواجه است. هزینه بالای تجهیزات پهپاد و نرم‌افزارهای پیشرفته تحلیل داده‌های مکانی، یکی از موانع اصلی گسترش این فناوری در مزارع است، در حالی که کمبود زیرساخت فنی و نیروی انسانی متخصص، به‌ویژه در مزارع کوچک و پراکنده، اجرای آن را با چالش‌های عملی مواجه می‌سازد. علاوه بر این، ویژگی‌های پراکندگی آفات و نیاز به پوشش یکنواخت در برخی نهاده‌ها مانند حشره‌کش‌ها، توانایی سیستم VRT در بهینه‌سازی کامل مصرف انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها را محدود می‌کند. این محدودیت‌ها نشان می‌دهند که به‌رغم پتانسیل بالای VRT در بهبود پایداری زیست‌محیطی و کارایی انرژی، موفقیت عملی آن نیازمند توسعه زیرساخت‌ها، آموزش نیروی انسانی و طراحی استراتژی‌های کاربردی متناسب با شرایط واقعی

شبهه‌سازی فناوری نرخ متغیر (VRT) در مصرف نهاده‌های شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم منجر به کاهش ۱۷/۹ درصد در انرژی مصرفی نهاده‌ها شد. با توجه به ۱۲/۹۵ میلیون هکتار زمین کشاورزی قابل کشت در ایران که از این میزان، ۱۰/۲ میلیون هکتار به غلات اختصاص دارد (Ministry of Jihad-e-agri, 2021)، چنین کاهش انرژی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تراز انرژی ملی داشته باشد. بهبود کلی تمام شاخص‌های انرژی در این مطالعه نشان می‌دهد که حرکت به سوی مدیریت مکان‌محور و تنظیم نرخ مصرف نهاده‌ها می‌تواند پایداری تولید را افزایش دهد. بیشترین درصد کاهش در مصرف مربوط به علف‌کش‌های شیمیایی (۸۰/۴۰٪) و کودهای پتاسیم (۷۷٪) بود. کاهش علف‌کش‌ها بر اساس نقشه پراکنش علف‌های هرز و کاهش کود پتاسیم ناشی از میزان بالای پتاسیم خاک طبق نقشه حاصلخیزی زمین تعیین شد. استفاده از حشره‌کش‌ها بدون تغییر باقی ماند، زیرا روش کاربرد آن‌ها نیازمند پوشش یکنواخت در تمام سطح مزرعه است. برخلاف پراکنش علف‌های هرز، حضور آفات تکه‌ای نیست و باید به‌طور جامع مدیریت شود (Baradaran Motie, Saeidirad, & Jafarian, 2023).

در رویکرد VRT، سهم کودها و علف‌کش‌ها در کل انرژی مصرفی کاهش یافت، در حالی که سهم بذر از ۱۸/۷۲ درصد به ۲۲/۸۰ درصد افزایش یافت. این افزایش در نهاده‌های تجدیدپذیر به پایداری تولید کمک می‌کند.

تحلیل مستقیم داده‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش مصرف نیتروژن و پتاسیم مستقیماً با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GWP) و آلاینده‌ها در هوا، آب و خاک مرتبط است. به‌طور مثال، کاهش مصرف کود نیتروژن در سیستم VRT باعث کاهش ۲۰ درصدی شاخص گرمایش جهانی شد و کاهش مصرف سوخت دیزل و انرژی مستقیم مزرعه‌ای منجر به کاهش انتشار CO₂ و N₂O شد. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که مدیریت مکان‌محور نهاده‌ها می‌تواند هم‌زمان بهبود کارایی انرژی و کاهش اثرات

مزارع است. برآورد شده است که حدود ۱۵ درصد از هزینه‌های تولید کشاورزی در سطح مزرعه مرتبط با انرژی است. استفاده مؤثرتر از منابع انرژی و گسترش بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح مزرعه می‌تواند هم هزینه‌ها را کاهش دهد و هم انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد (Jensen et al., 2012). استفاده از فناوری نرخ متغیر در مصرف آفت‌کش‌ها در باغات پرتقال منجر به کاهش ۴۶ درصدی مصرف آفت‌کش شد که به افزایش بهره‌وری انرژی (از ۰/۵۹۴ به ۰/۶۵۰) و کارایی انرژی (از ۰/۳۱۳ به ۰/۳۴۲) کیلوگرم بر مگاژول) منجر گردید (Fathi, Ghasemi-Nejad-Raeini, Abdanan Mehdizadeh, Taki, & Mardani Najafabadi, 2025). در کشت غلات، فناوری نرخ متغیر در مصرف کودهای شیمیایی باعث کاهش ۳۳ درصد تا ۵۶ درصد در مصرف کودها شد که به نوبه خود کارایی اقتصادی را بهبود داده و آلاینده‌های محیطی را کاهش داد (Guerrero & Mouazen, 2021). اعمال علف‌کش‌ها با استفاده از پهپاد، عملکرد گندم و بازده اقتصادی را تا ۱۴/۶ درصد افزایش داد، به‌طوری‌که عملکرد با پهپاد به ۹۲۸۳/۴ کیلوگرم در هکتار رسید، در حالی‌که در روش دستی ۸۰۹۷/۵۸ کیلوگرم در هکتار بود (Hunter et al., 2020). نتایج استفاده از نرخ متغیر نیتروژن نشان داد که این روش منجر به کاهش شستشوی نیترات و افزایش بازده اقتصادی خالص نسبت به کاربرد یکنواخت نیتروژن شد. علاوه بر این، آلودگی محیطی کمتری در محدوده ۱۳/۶ هکتاری مطالعه ایجاد کرد (Basso et al., 2016).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مطالعات حاضر نشان داد که استفاده از فناوری نرخ متغیر (VRT) برای مدیریت نهاده‌های شیمیایی در تولید گندم، به‌طور هم‌زمان باعث بهبود کارایی انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی شد. شاخص‌های انرژی نشان دادند که سیستم VRT نسبت به روش مرسوم، مصرف کل انرژی ورودی کمتری دارد و تمامی شاخص‌های انرژی شامل نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و شدت انرژی بهبود

یافته‌اند. خالص انرژی تولیدشده در سیستم VRT نیز بیشتر از سیستم مرسوم بود و نشان‌دهنده استفاده بهینه از انرژی‌های مستقیم و غیرمستقیم است. از دیدگاه زیست‌محیطی، استفاده از VRT منجر به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها به هوا، آب و خاک شد. شاخص گرمایش جهانی (GWP) در این سیستم حدود ۱۷/۶۹۱ کیلوگرم CO₂ معادل بود که نسبت به رویکرد مرسوم کاهش تقریبی ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. این کاهش عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن و کاهش انتشار مستقیم مزرعه‌ای بود. همچنین، کاهش انتشار آلاینده‌های هوا مانند CO₂، N₂O و NH₃ به ترتیب ۱۶/۲ درصد، ۲۱/۹ درصد و ۲۲/۵ درصد، و کاهش آلاینده‌های آب مانند نیترات و فسفر به ترتیب ۲۲/۴ درصد و ۳۸/۹ درصد، نشان‌دهنده بهبود کیفیت منابع هوا و آب است. در خاک نیز فلزات سنگین آلاینده مانند Pb و Zn به ترتیب حدود ۲۲/۴ درصد و ۳۵ درصد کاهش یافتند، در حالی‌که فلزات کم‌اثر مانند Mn، B، Fe و Mo تغییر قابل توجهی نشان ندادند. کل هزینه اجتماعی روش VRT نسبت به سیستم مرسوم در حدود ۲۰ درصد کاهش یافت. در مجموع، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که پیاده‌سازی سیستم نرخ متغیر نهاده‌ها می‌تواند هم‌زمان منجر به صرفه‌جویی انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها و افزایش پایداری زیست‌محیطی تولید گندم شود. این یافته‌ها کاربرد عملی و علمی روش VRT را به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت پایدار نهاده‌ها و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی تأیید می‌کنند.

مشارکت نویسندگان

اشکان جلیلیان: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل آماری، استخراج و تهیه متن اولیه

محمد مهدی قاسمی: اعتبارسنجی، مشاوره فنی

حسن قاسمی مبتکر: پردازش داده‌ها، روش‌شناسی

علی کعب: تصویرسازی نتایج، پردازش داده‌ها، ویرایش متن

References

- Anastasiou, E., Fountas, S., Voulgaraki, M., Psiroukis, V., Koutsiaras, M., Kriezi, O., Lazarou, E., Vatsanidou, A., Fu, L., Bartolo, F. Di, Barreiro-Hurle, J., & Gómez-Barbero, M. (2023). Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100323. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2023.100323>
- Azizpanah, A., Fathi, R., & Taki, M. (2023). Eco-energy and environmental evaluation of cantaloupe production by life cycle assessment method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(1), 1854-1870. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-22307-2>
- Baradaran Motie, J. B., Saeidirad, M. H., & Jafarian, M. (2023). Identification of Sunn-pest affected (*Eurygaster integriceps* put.) wheat plants and their distribution in wheat fields using aerial imaging. *Ecological Informatics*, 76, 102146. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2023.102146>
- Basavalingaiah, K., Ramesha, Y. M., Paramesh, V., Rajanna, G. A., Jat, S. L., Dhar Misra, S., Kumar Gaddi, A., Girisha, H. C., Yogesh, G. S., Raveesha, S., Roopa, T. K., Shashidhar, K. S., Kumar, B., El-Ansary, D. O., &

- Elansary, H. O. (2020). Energy Budgeting, Data Envelopment Analysis and Greenhouse Gas Emission from Rice Production System: A Case Study from Puddled Transplanted Rice and Direct-Seeded Rice System of Karnataka, India. *Sustainability*, 12(16), 6439. <https://doi.org/10.3390/su12166439>
5. Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of The Total Environment*, 227-235. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.12.104>
6. Dekamin, M., Kheiralipour, K., & Afshar, R. K. (2022). Energy, economic, and environmental assessment of coriander seed production using material flow cost accounting and life cycle assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 83469-83482. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-21585-0>
7. Esposito, M., Crimaldi, M., Cirillo, V., Sarghini, F., & Maggio, A. (2021). Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/S40538-021-00217-8>
8. Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., Zajiček, A., Duffková, R., Evangelou, E., & Nino, P. (2020). Assessment of the economic and environmental sustainability of Variable Rate Technology (VRT) application in different wheat intensive European agricultural areas. A Water energy food nexus approach. *Environmental Science & Policy*, 114, 366-376. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2020.08.019>
9. Fathi, R., Ghasemi-Nejad-Raeini, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Taki, M., & Mardani Najafabadi, M. (2025). Energy-environmental evaluation of conventional and variable rate technology sprayer; application of Life Cycle Assessment. *PLOS ONE*, 20(2), e0314911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314911>
10. Ghasemi-Mobtaker, H., Mostashari-Rad, F., Saber, Z., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Application of photovoltaic system to modify energy use, environmental damages and cumulative exergy demand of two irrigation systems-A case study: Barley production of Iran. *Renewable Energy*, 160, 1316-1334. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.047>
11. Ghasemi-Mobtaker, H., Ataiee, F. S., Akram, A., & Kaab, A. (2024). Feasibility study of using photovoltaic cells for a commercial hydroponic greenhouse: Energy analysis and life cycle assessment. *e-Prime- Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 8, 100597. <https://doi.org/10.1016/J.PRIME.2024.100597>
12. Guerrero, A., & Mouazen, A. M. (2021). Evaluation of variable rate nitrogen fertilization scenarios in cereal crops from economic, environmental and technical perspective. *Soil and Tillage Research*, 213, 105110. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105110>
13. Gutjahr, C., Sökefeld, M., & Gerhards, R. (2012). Evaluation of two patch spraying systems in winter wheat and maize. *Weed Research*, 52(6), 510-519. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3180.2012.00943.X>
14. Hesampour, R., Hassani, M., Hanafiah, M. M., & Heidarbeigi, K. (2022). Technical efficiency, sensitivity analysis and economic assessment applying data envelopment analysis approach: A case study of date production in Khuzestan State of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.08.003>
15. Hou, D., Meng, X., Qin, M., Zheng, E., Chen, P., Meng, F., & Zhang, C. (2024). Nitrous oxide (N₂O) emission characteristics of farmland (rice, wheat, and maize) based on different fertilization strategies. *PLOS ONE*, 19(7). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0305385>
16. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1246-Y>
17. Hunter, J. E., Gannon, T. W., Richardson, R. J., Yelverton, F. H., & Leon, R. G. (2020). Integration of remote-weed mapping and an autonomous spraying unmanned aerial vehicle for site-specific weed management. *Pest Management Science*, 76(4), 1386-1392. <https://doi.org/10.1002/ps.5651>
18. Jalilian, A., Jahansouz, M. R., Ghasemi Mobtaker, H., Oveisi, M., & Moghadam, H. (2023). Evaluation of Energy Indicators in Monoculture, Intercropping, and Agroforestry Systems of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) Production in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(2), 141-154. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.348292.654938>
19. Jensen, H. G., Jacobsen, L. B., Pedersen, S. M., & Tavella, E. (2012). Socioeconomic impact of widespread adoption of precision farming and controlled traffic systems in Denmark. *Precision Agriculture*, 13(6), 661-677. <https://doi.org/10.1007/S11119-012-9276-3>
20. Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S., & Jalalvand, M. (2024). Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100357. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2024.100357>
21. Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. (2019a). Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. *Science of The Total Environment*, 664, 1005-1019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.004>
22. Kaab, A., Sharifi, M., Mobli, H., Nabavi-Pelesaraei, A., & Chau, K. (2019b). Use of optimization techniques for

- energy use efficiency and environmental life cycle assessment modification in sugarcane production. *Energy*, 181, 1298-1320. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.002>
23. Kaab, A., Sharifi, M., & Moradi, H. (2021). Analysis of Energy Indicators and Environmental Impacts of Dryland Cantaloupe Production with Life Cycle Assessment Approach (Case Study: Ilam). *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 491-504. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.82119>
 24. Kaab, A., Ghasemi-Mobtaker, H., & Sharifi, M. (2023). A study of changes in energy consumption trend and environmental indicators in the production of agricultural crops using a life cycle assessment approach in the years 2018-2022. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 54, 1-18. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2023.364738.665522>
 25. Kaur, S., Kaur, R., & Chauhan, B. S. (2018). Understanding crop-weed-fertilizer-water interactions and their implications for weed management in agricultural systems. *Crop Protection*, 103, 65-72. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2017.09.011>
 26. Khanali, M., Salehpour, T., Rajabipour, A., & Kaab, A. (2025). Mitigating environmental impacts of cineraria production in greenhouses: A life cycle assessment approach for sustainability. *Energy Nexus*, 18, 100453. <https://doi.org/10.1016/J.NEXUS.2025.100453>
 27. MacLaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., & Dehnen-Schmutz, K. (2020). An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4), 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6>
 28. Meesaragandla, S., Jagtap, M. P., Khatri, N., Madan, H., & Vadduri, A. A. (2024). Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: A comprehensive review. *Results in Engineering*, 21, 101870. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101870>
 29. Ministry of Jihad-e-Agriculture of Iran. (2021). Annual Agricultural Statistics. www.maj.ir.
 30. Misbah, K., Laamrani, A., Khechba, K., Dhiba, D., & Chehbouni, A. (2021). Multi-Sensors Remote Sensing Applications for Assessing, Monitoring, and Mapping NPK Content in Soil and Crops in African Agricultural Land. *Remote Sensing*, 14(1), 81. <https://doi.org/10.3390/rs14010081>
 31. Monteiro, A., & Santos, S. (2022). Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management. *Agronomy*, 12(1), 118. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010118>
 32. Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2021). Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123788>
 33. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohammadkashi, N., Chau, K., & Mostashari-Rad, F. (2022). Principle of Life Cycle Assessment and Cumulative Exergy Demand for Biodiesel Production: Farm-To-Combustion Approach. In *Synergy Development in Renewables Assisted Multi-carrier Systems* (pp. 127–169). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90720-4_6
 34. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Shamshirband, S. (2016). Modeling energy consumption and greenhouse gas emissions for kiwifruit production using artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 133, 924-931. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.188>
 35. Nejad, M. S., Almassi, M., & Ghahderijani, M. (2023). Life cycle energy and environmental impacts in sugarcane production: A case study of Amirkabir Sugarcane Agro-Industrial Company in Khuzestan province. *Results in Engineering*, 20, 101545. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101545>
 36. Ozkan, B., Akcaoz, H., & Fert, C. (2004). Energy input-output analysis in Turkish agriculture. *Renewable Energy*, 29, 39-51. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00135-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00135-6)
 37. Pogrzeba, M., Rusinowski, S., & Krzyżak, J. (2018). Macroelements and heavy metals content in energy crops cultivated on contaminated soil under different fertilization—case studies on autumn harvest. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12), 12096-12106. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-1490-8>
 38. Radočaj, D., Jurišić, M., & Gašparović, M. (2022). The Role of Remote Sensing Data and Methods in a Modern Approach to Fertilization in Precision Agriculture. *Remote Sensing*, 14(3), 778. <https://doi.org/10.3390/rs14030778>
 39. Roslim, M. H. M., Juraimi, A. S., Che'Ya, N. N., Sulaiman, N., Manaf, M. N. H. A., Ramli, Z., & Motmainna, M. (2021). Using Remote Sensing and an Unmanned Aerial System for Weed Management in Agricultural Crops: A Review. *Agronomy*, 11(9), 1809. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091809>
 40. Rostami, H., Azizpanah, A., Fathi, R., & Taki, M. (2025). Comparative analysis of environmental impact and energy consumption in sesame and mung bean production using life cycle assessment and data envelopment analysis. *Energy Nexus*, 17, 100397. <https://doi.org/10.1016/J.NEXUS.2025.100397>
 41. Saadi, H., Behnia, M., Taki, M., & Kaab, A. (2025). A comparative study on energy use and environmental impacts in various greenhouse models for vegetable cultivation. *Environmental and Sustainability Indicators*, 25, 100553. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2024.100553>
 42. Saber, Z., van Zelm, R., Pirdashti, H., Schipper, A.M., Esmaeili, M., Motevali, A., Nabavi-Pelesaraei, A., &

- Huijbregts, M. A. J. (2021). Understanding farm-level differences in environmental impact and eco-efficiency: The case of rice production in Iran. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1021-1029. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.033>
43. Saha, A. K., Saha, J., Ray, R., Sircar, S., Dutta, S., Chattopadhyay, S. P., & Saha, H. N. (2018). IOT-based drone for improvement of crop quality in agricultural field. *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2018, 2018-January*, 612-615. <https://doi.org/10.1109/CCWC.2018.8301662>
 44. Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., & Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-16. <https://doi.org/10.1007/S42452-019-1485-1/TABLES/4>
 45. Soltani, N., Dille, J. A., Burke, I. C., Everman, W. J., VanGessel, M. J., Davis, V. M., & Sikkema, P. H. (2016). Potential Corn Yield Losses from Weeds in North America. *Weed Technology*, 30(4), 979-984. <https://doi.org/10.1614/WT-D-16-00046.1>
 46. Taherzadeh-Shalmai, N., Rafiee, M., Kaab, A., Khanali, M., Vaziri Rad, M. A., & Kasaeian, A. (2023). Energy audit and management of environmental GHG emissions based on multi-objective genetic algorithm and data envelopment analysis: An agriculture case. *Energy Reports*, 10, 1507-1520. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.08.020>
 47. Taherzadeh-Shalmai, N., Sharifi, M., Ghasemi-Mobtaker, H., & Kaab, A. (2021). Evaluating the energy use, economic and environmental sustainability for smoked fish production from life cycle assessment point of view (case study: Guilan Province, Iran). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 53833-53846. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-14437-W/TABLES/9>
 48. Wang, Y., Yuan, Y., Yuan, F., Ata-UI-Karim, S. T., Liu, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., & Cao, Q. (2023). Evaluation of Variable Application Rate of Fertilizers Based on Site-Specific Management Zones for Winter Wheat in Small-Scale Farming. *Agronomy*, 13(11), 2812. <https://doi.org/10.3390/agronomy13112812>
 49. You, M., Yao, D., Xu, F., Zhang, C., & Meng, J. (2022). Surface modification of rGO with PEG for the improvement of water/salt selectivity of CTA/rGO nanocomposites for desalination membrane applications. *Polymer*, 256, 125228. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2022.125228>
 50. Zhang, X. Q., Liang, Y. J., Qin, Z. Q., Li, D. W., Wei, C. Y., Wei, J. J., Li, Y. R., & Song, X. P. (2019). Application of Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle Application in Management of Stem Borer (Lepidoptera) in Sugarcane. *Sugar Tech*, 21(5), 847-852. <https://doi.org/10.1007/S12355-018-0695-Y>