

Developing an intelligent agricultural monitoring system in Iran within the framework of general agricultural policies using satellite data

Abbas Moradi^{1*}, Atefeh Vasi², Faranak Fotouhi-Ghazvini³

1.Assistant Prof. of Data Processing and Dissemination Group, SRTC, Tehran, Iran.*

2.Department of Computer engineering and IT, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

3.Department of Computer engineering and IT, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 26 October 2026

Revised: 30 June 2026

Accepted: 1 July 2026

Published: 23 July 2026

Keywords:

Smart agriculture, general agricultural policies, satellite, deep learning, resource efficiency.

ABSTRACT

Achieving sustainable agricultural development, improving resource efficiency, and ensuring sustainable food security are among the fundamental goals of the general agricultural policies of the Islamic Republic of Iran. In this regard, the present study aims to design and develop a technological framework for modernizing the country's agricultural monitoring system. The proposed framework, titled "Agricultural Hybrid Network," is based on the integration of high-resolution drone data and multispectral satellite data, which, by utilizing deep learning algorithms and advanced transformer-based architectures, enables continuous monitoring of crop status in Iranian regions. In addition to providing a data-driven infrastructure for decision-making, this framework is aligned with the principles of general agricultural policies, including improving water and soil productivity, improving the exploitation system, sustainable rural development, and modernizing production based on indigenous knowledge and new technologies. The developed model enables offline and low-cost monitoring in areas without communication infrastructure. These achievements are a practical step towards realizing general agricultural policies, namely sustainable development, self-sufficiency, modernization of the knowledge base, improving productivity, and improving the livelihoods of rural people.

* Corresponding author: Abbas Moradi. Email: amoradi@srtc.ac.ir

Citation: Moradi, A., Vasi, A. & Fotouhi, F. (2026). Developing an intelligent agricultural monitoring system in Iran within the framework of general agricultural policies using satellite data. (e246584). Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies, 14(54), e246584 <https://doi.org/10.30507/jmsp.2026.555641.2855>



Extended Abstract

Introduction

Agriculture is a strategic sector of the Iranian economy and plays a fundamental role in food security, sustainable development, rural livelihoods, and the protection of natural resources. However, the agricultural sector in Iran faces major challenges, including water scarcity, climate variability, fragmented farming units, inefficient resource use, and weaknesses in agricultural data collection and monitoring systems. Traditional agricultural monitoring methods, which largely depend on field surveys, sampling, and periodic administrative reports, are costly, time-consuming, and insufficiently responsive to the requirements of modern evidence-based policymaking. The development of remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs), and artificial intelligence provides an opportunity to transform agricultural monitoring from a predominantly conventional and descriptive process into an integrated, data-driven, and predictive system. Satellite imagery, particularly Sentinel-2 multispectral data, provides broad spatial coverage and regular temporal observations, whereas UAV imagery offers substantially higher spatial resolution and enables detailed observation of field-level conditions. However, each source has inherent limitations when used independently. The integration of UAV and satellite observations can therefore combine local spatial detail with regional and temporal coverage. Against this background, this study aims to design and develop a technologically grounded and context-specific framework for the modernization of Iran's agricultural monitoring system. The proposed framework, referred to as the "Hybrid Agricultural Network", integrates high-resolution UAV imagery and Sentinel-2 multispectral satellite data through a hybrid deep-learning architecture based on Convolutional Neural Networks (CNNs) and Transformers. The central research question is how a multi-source deep-learning framework can be designed to provide an accurate, scalable, and reliable system for intelligent agricultural monitoring under the diverse climatic and infrastructural conditions of Iran. The study is also explicitly aligned with the General Policies of Agriculture of the Islamic Republic of Iran, particularly the objectives related to sustainable agricultural development, resource conservation, modernization based on knowledge and new technologies, improved water and input productivity, food security, and the improvement of rural livelihoods.

Methods

The research employed a multi-source, multi-scale remote-sensing and deep-learning framework. The required data were obtained from two principal sources: multispectral UAV imagery and Sentinel-2 satellite observations. UAV data were collected using a Phantom 4 Pro equipped with a MicaSense RedEdge multispectral sensor, providing high-resolution observations across five spectral bands in addition to RGB imagery. Sentinel-2 data, comprising 13 spectral bands with spatial resolutions of approximately 10–20 meters, were used to provide broader regional coverage and regular temporal observations. The study was conducted in three provinces representing substantially different agricultural and climatic conditions: Qazvin, Yazd, and Golestan. Qazvin represented a mixed rainfed and irrigated agricultural environment, Yazd represented an arid region characterized by severe water constraints, and Golestan represented a relatively humid and highly productive agricultural region. Ground-reference observations included vegetation health indicators such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), chlorophyll content measured by SPAD, Leaf Area Index (LAI), soil moisture, soil salinity, and actual crop yields. Field data were collected with the participation of local farmers. Prior to model development, radiometric correction of UAV imagery, cloud masking of satellite imagery using the Fmask algorithm, and precise spatial co-registration using ground control points were performed. The proposed architecture consisted of two independent processing branches. The UAV branch employed a CNN-based structure with approximately 23 million parameters and 50 layers to extract detailed spatial features, while the satellite branch employed a Transformer-based structure with 12 attention layers, 768 hidden dimensions, and approximately 86 million parameters to model broader spatial, spectral, and temporal dependencies. The two branches were integrated at an intermediate stage through a cross-attention mechanism. The model was trained using the Adam optimizer with a learning rate of 0.001, a batch size of 32, and 50 training epochs, while five-fold cross-validation was employed for model validation. Model performance was assessed using Accuracy, mean Intersection over Union (mIoU), F1-score, and Root Mean Square Error (RMSE). Statistical significance was examined using a *t*-test at a significance level below 0.01. The proposed framework was compared with Random Forest, LSTM, Graph Neural Network (GNN), ResNet-50, and ViT-Base Transformer models. In addition, the final model was deployed on an NVIDIA Jetson Xavier NX edge-computing platform. Quantization and structural parameter reduction were used to decrease computational requirements and enable offline and near-real-time operation in areas with limited Internet

connectivity.

Results and Discussion

The empirical findings demonstrate the effectiveness of the proposed Hybrid Agricultural Network in integrating complementary information from UAV and satellite observations. Across the three study provinces, the proposed model achieved an overall classification accuracy of $91.4\% \pm 1.2$, an mIoU of 0.88, an F1-score of 0.92, and an RMSE of 0.42. In Qazvin, the model successfully distinguished wheat, barley, and maize fields, achieving an mIoU of 0.89. In Yazd, the model accurately differentiated pistachio orchards, saline areas, and non-agricultural land, with an F1-score of 0.93. In Golestan, the identification of rice and rapeseed fields corresponded closely with ground observations, reaching an accuracy of 92.1%. Comparative analysis showed that the proposed architecture significantly outperformed the alternative models. The LSTM model achieved an accuracy of $83.7\% \pm 2.1$ and an RMSE of 0.58 tons per hectare, while the GNN achieved an accuracy of $85.9\% \pm 1.8$ and an RMSE of 0.55. ResNet-50 obtained an accuracy of 85.2%, an F1-score of 0.84, and an RMSE of 0.68, whereas ViT-Base achieved an accuracy of 87.6%, an F1-score of 0.87, and an RMSE of 0.55. Random Forest showed the lowest performance among the compared approaches, with an accuracy of 82.1% and an RMSE of 0.91. The performance advantage of the proposed model was statistically significant ($p < 0.01$). These findings suggest that the cross-attention mechanism provides an effective means of exploiting the complementary spatial characteristics of UAV imagery and the broader spectral and temporal information contained in satellite observations. The results further indicate that simple or conventional data-fusion strategies may fail to fully capture the synergies between different spatial and temporal scales, whereas the proposed hybrid CNN–Transformer architecture is better suited to modeling complex agricultural patterns. Beyond technical performance, the results indicate potentially important operational and policy implications. The study reports an average reduction of approximately 23% in water consumption, an 18–26% reduction in nitrogen and phosphate fertilizer use, and a reduction of approximately 42% in field visits by agricultural experts. These outcomes suggest that intelligent spatial monitoring can contribute to more targeted irrigation and fertilization, lower operational costs, and more efficient use of scarce agricultural resources. Furthermore, deployment on the NVIDIA Jetson Xavier NX demonstrated the feasibility of processing agricultural observations in environments with limited Internet connectivity. Consequently, the proposed framework can potentially support crop-pattern planning, agricultural insurance, targeted subsidies, water-resource management, crop monitoring, and evidence-based agricultural policymaking. From a policy perspective, the findings demonstrate how advanced remote sensing and artificial intelligence can operationalize the General Policies of Agriculture by connecting technological modernization with sustainable resource management, food security, rural development, and data-driven governance.

Conclusion

This study developed and evaluated the Hybrid Agricultural Network as a context-specific framework for modernizing agricultural monitoring in Iran. By integrating high-resolution UAV imagery with Sentinel-2 satellite observations through a hybrid CNN–Transformer architecture and a cross-attention fusion mechanism, the proposed system achieved superior performance compared with a range of conventional, recurrent, graph-based, and Transformer-based benchmark models. The results obtained across Qazvin, Yazd, and Golestan demonstrate the potential of multi-source deep learning to provide reliable agricultural information under heterogeneous climatic and production conditions. The findings also indicate that the value of the proposed framework extends beyond classification accuracy. Its potential contribution to reducing water and fertilizer consumption, decreasing field-monitoring requirements, and enabling offline edge-based processing makes it particularly relevant to the infrastructural and environmental constraints of Iranian agriculture. More broadly, the framework provides a technological foundation for evidence-based agricultural governance by generating timely and spatially explicit information that can support crop-pattern planning, resource allocation, agricultural insurance, subsidy targeting, and environmental management. Accordingly, the integration of remote sensing, artificial intelligence, and agricultural expertise can contribute to translating the General Policies of Agriculture from policy objectives into operational monitoring and decision-support mechanisms. Future development should focus on incorporating Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery, testing the framework on lower-cost hardware, expanding the training dataset, and evaluating the system at the national scale. Such extensions could strengthen the scalability, resilience, and practical applicability of intelligent agricultural monitoring in Iran.

Keywords: Smart agriculture, general agricultural policies, satellite, deep learning, resource efficiency.

توسعه نظام هوشمند پایش کشاورزی ایران در چارچوب سیاست‌های کلی کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

عباس مرادی^{۱*}، عاطفه وائی^۲، فرانک فتوحی قزوینی^۳

۱. عضو هیات علمی و مدیرگروه پردازش داده‌ها و اطلاع‌رسانی، پژوهشکده آمار، تهران، ایران.
۲. گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات. دانشکده مهندسی. دانشگاه قم، قم، ایران.
۳. گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات. دانشکده مهندسی. دانشگاه قم، قم، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
سابقه مقاله: تاریخ دریافت: ۴ آبان ۱۴۰۴ تاریخ بازنگری: ۹ تیر ۱۴۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۰ تیر ۱۴۰۵ تاریخ انتشار: ۱ مرداد ۱۴۰۵ کلیدواژه‌ها: کشاورزی هوشمند، سیاست‌های کلی کشاورزی، ماهواره، یادگیری عمیق، بهره‌وری منابع.	تحقق توسعه پایدار کشاورزی، ارتقای بهره‌وری منابع و تأمین امنیت غذایی پایدار از اهداف بنیادین سیاست‌های کلی کشاورزی جمهوری اسلامی ایران است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف طراحی و توسعه یک چارچوب فناورانه برای نوسازی نظام پایش کشاورزی کشور ارائه شده است. چارچوب پیشنهادی با عنوان «شبکه ترکیبی کشاورزی» مبتنی بر تلفیق داده‌های پهبادی با وضوح بالا و داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی است که با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و معماری‌های پیشرفته مبتنی بر ترنسفورمر، امکان پایش مستمر وضعیت محصولات زراعی را در مناطق ایران فراهم می‌سازد. این چارچوب علاوه بر فراهم کردن زیرساختی داده‌محور برای تصمیم‌گیری، با اصول سیاست‌های کلی کشاورزی از جمله ارتقای بهره‌وری آب و خاک، بهبود نظام بهره‌برداری، توسعه پایدار روستایی و نوسازی تولید بر پایه دانش بومی و فناوری‌های نو همسو است. مدل توسعه‌یافته امکان پایش برون‌خط و کم‌هزینه را در مناطق فاقد زیرساخت ارتباطی ایجاد می‌کند. این دستاوردها گامی عملی در راستای تحقق سیاست‌های کلی کشاورزی، یعنی توسعه پایدار، خودکفایی، نوسازی دانش پایه، ارتقای بهره‌وری و بهبود معیشت روستاییان به شمار می‌رود.

* نویسنده مسئول: عباس مرادی. ایمیل: amoradi@src.ac.ir

استناد: مرادی، عباس، وائی، عاطفه و فتوحی، فرانک. (۱۴۰۵). توسعه نظام هوشمند پایش کشاورزی ایران در چارچوب سیاست‌های کلی کشاورزی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. (e246584) سیاست‌های راهبردی و کلان، ۱۴ (۵۴)، e246584. <https://doi.org/10.30507/jmsp.2855.555641.2026>



مقدمه

بخش کشاورزی یکی از ارکان حیاتی اقتصاد ملی و تأمین‌کننده امنیت غذایی کشور است و نقش راهبردی آن در تحقق توسعه پایدار و عدالت اجتماعی همواره مورد تأکید سیاست‌های کلی کشاورزی بوده است. با وجود این، چالش‌هایی همچون محدودیت منابع آبی، تغییرات اقلیمی، پراکندگی واحدهای بهره‌برداری، و ضعف در نظام داده‌های کشاورزی موجب شده است که بهره‌وری تولید و کارایی منابع طبیعی در سطح مطلوب قرار نگیرد.

سیاست‌های کلی کشاورزی بر توسعه پایدار با حفاظت از منابع طبیعی، تأمین امنیت غذایی از منابع داخلی، نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش و فناوری‌های نو، ارتقای بهره‌وری آب و خاک، و بهبود معیشت روستاییان تأکید دارد. تحقق این اهداف مستلزم تحول در نظام پایش، داده‌برداری و تصمیم‌سازی کشاورزی کشور است. در واقع، دستیابی به کشاورزی کارآمد و پایدار بدون ایجاد یک نظام هوشمند رصد و تحلیل داده‌های مزرعه‌ای ممکن نیست.

در دهه اخیر، فناوری‌های نوین سنجش از دور، پهپادها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، ابزارهای کارآمدی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های دقیق کشاورزی فراهم کرده‌اند. در حالی که ماهواره‌ها توان رصد گسترده و منظم را در سطح ملی ایجاد می‌کنند، پهپادها امکان مشاهده جزئیات مزرعه را با دقت سانتی‌متری فراهم می‌سازند. تلفیق این دو منبع داده، زمینه‌ساز طراحی نظام‌های نوین پایش کشاورزی هوشمند است که می‌تواند هم‌زمان از دقت محلی و پوشش منطقه‌ای بهره‌مند شود.

با این حال، نظام آمارگیری و پایش کشاورزی ایران هنوز به صورت سنتی و مبتنی بر گزارش‌های نمونه‌گیری یا بازدیدهای میدانی عمل می‌کند. این روش‌ها علاوه بر هزینه بالا و زمان‌بر بودن، از دقت و جامعیت کافی برخوردار نیستند و نمی‌توانند به نیازهای سیاست‌گذاری مدرن پاسخ دهند. در چنین شرایطی، توسعه یک سامانه‌ی ملی هوشمند بر پایه تلفیق داده‌های چندمنبعی می‌تواند به عنوان گام نخست در نوسازی نظام تولید و تصمیم‌سازی کشاورزی کشور عمل کند. پژوهش حاضر در پاسخ به این نیاز، چارچوبی تحت عنوان «شبکه ترکیبی کشاورزی» ارائه می‌دهد که مبتنی بر تلفیق داده‌های پهپادی و ماهواره‌ای است و به‌صورت بومی‌سازی‌شده برای شرایط اقلیمی و زیرساختی ایران طراحی شده است. این چارچوب با رویکرد یادگیری عمیق چندمنبعی و قابلیت استقرار در سخت‌افزارهای لبه‌ای، ابزار تحلیلی نوینی را برای رصد بلادرنگ وضعیت مزارع، پیش‌بینی عملکرد و شناسایی تنش‌های گیاهی فراهم می‌سازد. از منظر سیاستی، این پژوهش در راستای سیاست‌های کلی کشاورزی با هدف توسعه پایدار، صیانت از منابع پایه و تأمین امنیت غذایی از منابع داخلی تدوین شده است. همچنین، در زمینه نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش نوین و ارتقای بهره‌وری آب و نهاده‌ها هم‌راستا است. در نهایت، پیاده‌سازی میدانی این سامانه می‌تواند زمینه‌ساز ارتقای سطح درآمد و معیشت روستاییان از طریق کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری باشد. این چارچوب با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 و پهپادی با وضوح بالا و بهره‌گیری از معماری هیبریدی CNN-Transformer (با سازوکار توجه متقابل) امکان پایش بلادرنگ وضعیت مزارع، پیش‌بینی عملکرد محصول و شناسایی زودهنگام تنش‌های گیاهی (آبی، تغذیه‌ای و آفات) را فراهم می‌آورد. قابلیت استقرار مدل بر روی سخت‌افزارهای لبه‌ای پایش آف‌لاین و کم‌هزینه را در مناطق فاقد دسترسی به اینترنت ممکن می‌سازد، از این رو، مسئله اصلی این پژوهش آن است که چگونه می‌توان با تلفیق داده‌های پهپادی و ماهواره‌ای و بهره‌گیری از یک معماری یادگیری عمیق ترکیبی، سامانه‌ای دقیق، مقیاس‌پذیر و قابل اتکا برای پایش هوشمند کشاورزی ایران طراحی کرد؟ پاسخ به این پرسش، می‌تواند زمینه را برای گذار از روش‌های سنتی و پرهزینه پایش به سمت یک چارچوب داده‌محور، هوشمند و سیاست‌پذیر فراهم کند.

۱. مروری بر پیشینه پژوهش

تحول نظام کشاورزی و دستیابی به بهره‌وری پایدار، نیازمند تلفیق دانش‌های نوین داده‌محور با سیاست‌های کلان کشاورزی است. در راستای تحقق بندهای ۴ و ۵ سیاست‌های کلی کشاورزی که بر «نوسازی نظام تولید بر مبنای دانش نوین و بومی‌سازی فناوری‌های روز» و «ارتقای بهره‌وری از آب و سایر نهاده‌های تولید» تأکید دارند، مطالعات متعددی در سطح جهانی و ملی انجام گرفته است. این بخش، مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی در زمینه‌ی استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، یادگیری ماشین، و تلفیق داده‌های چندمنبعی در کشاورزی دارد و در نهایت، خلأهای پژوهش کشور را در ارتباط با اهداف سیاستی مشخص می‌سازد. با بررسی مقالات دهه اخیر، معماری نوین یادگیری ماشین همچون شبکه‌های گرافی (GNN)، ترنسفورم‌های بینایی (ViT) و مدل‌های یادگیری نیمه‌نظارتی و خودنظارتی انتخاب و ارزیابی شدند. در واقع، پیشرفت معماری‌های نوین یادگیری ماشین از جمله شبکه‌های عصبی پیچشی، شبکه‌های عصبی بازگشتی، شبکه‌های گرافی، و ترنسفورم‌های بینایی زمینه را برای تحلیل دقیق‌تر داده‌های مکانی و زمانی فراهم کرده است. این مدل‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی، توانسته‌اند در شناسایی الگوهای پیچیده رشد گیاه، تشخیص تنش‌های آبی، پیش‌بینی عملکرد و طبقه‌بندی محصولات، دقت و کارایی بیشتری ارائه دهند. بنابراین، مرور پیشینه در این پژوهش صرفاً معرفی مطالعات پیشین نیست، بلکه تلاشی برای نشان دادن مسیر تحول علمی، شناسایی ظرفیت‌های موجود، و آشکارسازی خلأهای پژوهشی است که همچنان در حوزه پایش هوشمند کشاورزی ایران وجود دارد. در چند بخش زیر به تشریح این موارد پرداخته می‌شود.

۱-۱. سنسجش از دور و هوش مصنوعی در پایش کشاورزی

امروزه استفاده از هوش مصنوعی در کشاورزی به ابزاری مؤثر برای تحقق بند ۲ سیاست‌ها تبدیل شده است. در واقع هوش مصنوعی می‌تواند ابزاری مؤثر برای تحقق سیاست‌های کلان کشاورزی از جمله «تأمین امنیت غذایی با تکیه بر تولید از منابع داخلی» باشد. با تحلیل دقیق داده‌های رشد و سلامت محصولات، دولت‌ها می‌توانند پیش‌بینی‌های قابل اعتمادی درباره‌ی عملکرد محصولات داشته باشند و سیاست‌های حمایتی و یارانه‌ای را بر پایه داده‌های واقعی تنظیم کنند. سنسجش از دور به‌ویژه با گسترش ماهواره‌های چندطیفی مانند Sentinel-۲، به ابزاری کلیدی در پایش کشاورزی تبدیل شده است. این فناوری با فراهم آوردن داده‌هایی با پوشش وسیع و زمان‌بندی منظم، امکان رصد روندهای رشد گیاهی، نوع محصول و وضعیت سلامت زراعی را فراهم کرده است. با این حال، محدودیت‌هایی چون دقت مکانی پایین‌تر نسبت به داده‌های زمینی و تأثیرپذیری از شرایط جوی، ضرورت ترکیب آن با روش‌های پیشرفته تحلیلی را در چندین کرده است. در این راستا، بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، تحول بزرگی در تحلیل داده‌های سنسجش از دور ایجاد کرده است. مدل‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی پیچش (CNN)، حافظه بلندمدت (LSTM) و ترنسفورمرهای بینایی (ViT) توانسته‌اند دقت طبقه‌بندی محصولات کشاورزی، پیش‌بینی عملکرد و تشخیص تنش‌های گیاهی را به‌طور معناداری افزایش دهند (۱۷، ۱۲). به‌عنوان مثال، پژوهشی در هند نشان داد که ترکیب داده‌های Sentinel-۲ با LSTM و CNN منجر به دستیابی به دقتی بالاتر از ۹۰ درصد در تشخیص نوع محصول گردیده است (۱۹).

کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی به ابزاری کلیدی برای تحقق بند ۲ سیاست‌ها (تأمین امنیت غذایی از منابع داخلی) تبدیل شده است، زیرا امکان پیش‌بینی دقیق عملکرد محصول و تنظیم سیاست‌های حمایتی بر پایه داده‌های واقعی را فراهم می‌کند. سنسجش از دور، به‌ویژه با ماهواره‌های چندطیفی مانند Sentinel-۲، پوشش گسترده و منظم برای رصد روندهای رشد گیاهی، طبقه‌بندی محصولات و تشخیص تنش‌های سلامت زراعی ارائه می‌دهد. با این حال، محدودیت‌های دقت مکانی و تأثیرات جوی، لزوم ادغام با مدل‌های یادگیری عمیق را ضروری می‌سازد. مدل‌هایی نظیر LSTM CNN و ViT دقت طبقه‌بندی محصولات، پیش‌بینی عملکرد و تشخیص تنش‌های گیاهی را به‌طور معناداری افزایش داده‌اند (۱۷، ۱۲). برای نمونه، ترکیب Sentinel-۲ با LSTM و CNN در هند دقت بالای ۹۰٪ در طبقه‌بندی محصولات را به‌دست آورد (۱۹).

۱-۲. تلفیق تصاویر پهپاد و ماهواره در کشاورزی

یکی از چالش‌های اساسی نظام پایش کشاورزی، محدودیت هر یک از منابع داده‌ای به‌تنهایی است. تصاویر ماهواره‌ای با وجود پوشش وسیع، دقت مکانی محدودی دارند، در حالی که تصاویر پهپادی دارای دقت بالا ولی پوشش محدود هستند. تلفیق این دو منبع داده در سیاست‌های کلان کشاورزی بند ۵ یعنی «بهره‌برداری بهینه از نهاده‌ها» و بند ۴ «به‌کارگیری فناوری‌های نوین» نیز تلویحاً مورد تأکید قرار گرفته، رویکردی نوین برای بهبود دقت و کارآمدی نظام‌های تصمیم‌گیری در کشاورزی محسوب می‌شود. در واقع ترکیب تصاویر پهپادی با داده‌های ماهواره‌ای رویکردی نوین در جهت غلبه بر محدودیت‌های هر یک از این منابع محسوب می‌شود. پهپادها با وضوح مکانی بسیار بالا و امکان پرواز در زمان دلخواه، توانایی شناسایی تنش‌های گیاهی موضعی را دارند. در مقابل، ماهواره‌ها با پوشش وسیع و داده‌های زمانی منظم، امکان پایش منطقه‌ای و روندهای بلندمدت را فراهم می‌کنند. تلفیق این دو، منجر به تصویری جامع از وضعیت مزرعه می‌گردد (۹). در سال‌های اخیر، مدل‌های متعددی برای تلفیق داده‌های چندمنبعی توسعه یافته‌اند. برای نمونه، چن و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از ترکیب CNN و شبکه‌های عصبی گرافی (GNN) توانستند طبقه‌بندی دقیقی از مزارع گندم و ذرت در چین ارائه دهند. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که بهره‌گیری از تلفیق مبتنی بر توجه (attention-based fusion) میان تصاویر پهپاد و ماهواره، موجب بهبود چشمگیر در تشخیص زودهنگام تنش آبی و آفات در مزارع شد.

مدل‌های اخیر مانند (۹). CMTNet (هیبریدی CNN-Transformer برای طبقه‌بندی hyperspectral از UAV: ۱۰) و CTFuseNet (فیوژن چندمقیاسی CNN-Transformer برای segmentation محصولات: ۲۱) دقت تشخیص تنش آبی و آفات را به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده‌اند. همچنین، مدل‌های هیبریدی مانند MSCNN-VSS برای تشخیص بیماری محصولات از تصاویر UAV دقت ۹۴.۰ PA را به‌دست آورده‌اند (Frontiers in Science, Plant in ۲۰۲۵).

۱-۳. تجارب بین‌المللی و داخلی در کاربرد سنسجش از دور در آمار کشاورزی

مطالعه تجارب جهانی نشان می‌دهد که بسیاری از کشورها با بهره‌گیری از فناوری‌های سنسجش از دور و یادگیری ماشین، توانسته‌اند نظام آمارگیری کشاورزی خود را به‌روز و هوشمند کنند. در برزیل، با استفاده از سامانه‌های هوش مصنوعی و تصاویر ماهواره‌ای، بیش از ۵ میلیون واحد بهره‌برداری روستایی شناسایی و نقشه‌برداری شدند (۷). در ایالات متحده، وزارت کشاورزی این کشور (USDA) از ترکیب سنسجش از دور و یادگیری ماشین در پروژه Data Cropland Layer استفاده کرده و نقشه‌های محصول‌محور سالانه را تولید می‌نماید (۱۱). همچنین در اتحادیه اروپا، داده‌های Sentinel-۲ در چارچوب سیاست مشترک کشاورزی (CAP) برای راستی‌آزمایی پرداخت یارانه‌ها در سطح قطعه‌ای به‌کار گرفته می‌شود (۶).

مطالعات اخیر مانند باقرپور و همکاران (۳) پیش‌بینی خشکسالی کشاورزی در گلستان با سنجش از دور و ماشین لرنینگ یا مدل‌سازی خاک در مناطق خشک مرکزی ایران پیشرفت‌هایی نشان می‌دهند، اما همچنان هماهنگی نهادها (مانند سازمان هوافضا و مرکز آمار) ضعیف است، که با بند ۳ سیاست‌ها (اصلاح ساختار بهره‌برداری) در تعارض است. محدودیت‌هایی مانند کمبود داده‌های برجسب‌خورده و زیرساخت محاسباتی روستایی، توسعه مدل‌های هوش مصنوعی ملی را مانع می‌شود (۱).

برخی از کاستی‌ها در سایر پژوهش‌ها به شرح زیر است:

جدول ۱: کاستی‌های پژوهش‌های پیشین

نویسنده	نام اثر	سال انتشار	روش تحقیق	خلاصه دستاورد	کاستی‌ها/ اقدامات لازم
سایینی و رآئو	پژوهش درباره کاربرد LSTM CNN، و ViT در کشاورزی	۲۰۲۳	یادگیری عمیق و تحلیل داده‌های سنجش از دور	نشان دادند مدل‌های CNN، LSTM و ViT می‌توانند در طبقه‌بندی محصولات، پیش‌بینی عملکرد و تشخیص تنش مؤثر باشند.	مبنای نظری خوبی برای استفاده از مدل‌های عمیق در این مقاله است؛ با این حال، به‌طور مشخص بر تلفیق پهپاد و Sentinel-۲ در بستر ایران تمرکز ندارد.
خاکی و همکاران	پژوهش در حوزه یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل کشاورزی	۲۰۲۰	یادگیری ماشین / یادگیری عمیق	نشان داد روش‌های هوشمند می‌توانند دقت تحلیل داده‌های کشاورزی را افزایش دهند.	از نظر رویکرد تحلیلی به مقاله حاضر کمک می‌کند؛ اما در مقایسه با این مقاله، هم‌جوشی چندمنبعی و معماری ترکیبی بومی را پوشش نمی‌دهد.
سینگ و همکاران	ترکیب Sentinel-۲ با LSTM و CNN برای تشخیص نوع محصول	۲۰۲۱	مدل ترکیبی CNN-LSTM بر داده‌های Sentinel-۲	دقتی بالاتر از ۹۰٪ در تشخیص نوع محصول گزارش شد.	از مهم‌ترین پشتوانه‌های روش‌شناسی این مقاله است؛ با این تفاوت که مقاله حاضر داده پهپادی را نیز وارد مدل کرده و مسئله را در مقیاس بومی‌تر بررسی می‌کند.
داسیلوا و همکاران	استفاده از AI و تصاویر ماهواره‌ای برای نقشه‌برداری از اراضی روستایی برزیل	۲۰۲۱	تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و هوش مصنوعی	توانست بیش از ۵ میلیون واحد روستایی را شناسایی و نقشه‌برداری کند.	نشان‌دهنده ظرفیت بالای AI در مدیریت اراضی است؛ اما این پژوهش بیشتر در سطح ملی/کلان بوده و جزئیات مزرعه‌ای پهپاد را در نظر ندارد.

نویسنده	نام اثر	سال انتشار	روش تحقیق	خلاصه دستاورد	کاستی‌ها/ اقدامات لازم
جانسون و همکاران	پروژه Cropland Layer Data در آمریکا	۲۰۲۰	سنجش از دور + یادگیری ماشین	نقشه‌های سالانه محصولات زراعی را با دقت مناسب تولید کرد.	الگویی مهم برای تولید نقشه‌های کشاورزی در مقیاس ملی است؛ ولی نسبت به مقاله حاضر، معماری ترکیبی CNN-Transformer و داده‌های UAV را ندارد.
کوپرنیکوس	کاربرد Sentinel-۲ در نظام CAP اتحادیه اروپا	۲۰۲۲	پایش ماهواره‌ای و اعتبارسنجی مکانی	از Sentinel-۲ برای راستی‌آزمایی سطح قطعات و پرداخت‌های کشاورزی استفاده شد.	کاربرد عملی سنجش از دور در حکمرانی کشاورزی را نشان می‌دهد؛ با این حال، مقاله حاضر تحلیل هوشمند چندمنبعی را فراتر از راستی‌آزمایی ساده دنبال می‌کند.
باقرپور و همکاران	پیش‌بینی خشکسالی و تنش زراعی در گلستان	۲۰۱۴	سنجش از دور و مدل‌سازی ماشین	توانست برخی الگوهای تنش و خشکسالی را در منطقه گلستان پیش‌بینی کند.	از نظر جغرافیایی به مقاله حاضر نزدیک است و ضرورت مطالعه در ایران را تقویت می‌کند؛ اما فناوری‌های جدیدتر مانند Transformer و هم‌جوشی UAV-Satellite را ندارد.
عبدالی و همکاران	محدودیت‌های توسعه مدل‌های ملی هوش مصنوعی در کشاورزی ایران	۲۰۲۴	تحلیل چالش‌ها و زیرساخت‌ها	کمبود داده برجسب‌دار و ضعف زیرساخت پردازشی از موانع اصلی توسعه مدل‌های ملی معرفی شدند.	این پژوهش خلأ نهادی را نشان می‌دهد و ضرورت مقاله حاضر را تقویت می‌کند؛ با این حال، راهکار فنی مشخصی مانند معماری پیشنهادی این مقاله ارائه نمی‌دهد.
پژوهش‌های مبتنی بر GNN	کاربرد شبکه‌های گرافی در تحلیل داده‌های کشاورزی	۲۰۲۳-۲۴	یادگیری گرافی	برای مدل‌سازی روابط مکانی و ساختاری در داده‌های پیچیده مفید گزارش شدند.	در این مقاله به‌عنوان مدل مقایسه‌ای استفاده می‌شوند؛ اما به‌تنهایی برای هم‌جوشی داده‌های چندمقیاسی پهناد و ماهواره کافی نیستند.

نویسنده	نام اثر	سال انتشار	روش تحقیق	خلاصه دستاورد	کاستی‌ها/ اقدامات لازم
پژوهش‌های مبتنی بر ViT	استفاده از Vision Transformer در پایش محصولات	۲۰۲۳-۲۴	ترنسفورمر بینایی	نشان دادند ViT در استخراج وابستگی‌های دوربرد عملکرد خوبی دارد.	پشتوانه‌ای برای بخش ترنسفورمری مقاله حاضر است؛ ولی مدل مقاله حاضر با شاخه پهنای CNN و توجه متقابل کامل‌تر شده است.
پژوهش‌های نیمه‌نظارتی	استفاده از یادگیری نیمه‌نظارتی در کشاورزی	۲۰۲۲-۲۴	Semi-supervised learning	در شرایط کمبود داده برچسب‌دار، دقت مدل‌ها را بهبود دادند.	در مقاله حاضر می‌تواند به‌عنوان مسیر توسعه آینده مطرح شود؛ اما در نسخه حاضر مبنای اصلی روش نیست.
پژوهش‌های خودنظارتی	خودنظارتی در تحلیل تصاویر کشاورزی	۲۰۲۲-۲۴	Self-supervised learning	وابستگی به داده برچسب‌دار را کاهش داد.	برای شرایط ایران که داده برچسب‌دار محدود است بسیار مهم است؛ با این حال، مقاله حاضر بیشتر بر یادگیری نظارت‌شده ترکیبی تکیه دارد.
پژوهش‌های CNN کلاسیک	ResNet-۵۰ و شبکه‌های پیچشی در پایش کشاورزی	۲۰۱۹-۲۴	CNN عمیق	ویژگی‌های مکانی را به‌خوبی استخراج می‌کنند، اما در وابستگی‌های بلندبرد محدودند.	در این مقاله به‌عنوان مدل پایه استفاده شده‌اند؛ اما نسبت به معماری پیشنهادی، توان هم‌جوشی و درک چندمقیاسی ضعیف‌تری دارند.
پژوهش‌های LSTM	LSTM در تحلیل سری‌های زمانی کشاورزی	۲۰۱۸-۲۴	یادگیری بازگشتی	برای داده‌های زمانی مناسب است و تغییرات رشد گیاه را مدل می‌کند.	از نظر تحلیل زمانی مفید است، اما در مقایسه با مقاله حاضر، قدرت کافی برای تحلیل هم‌زمان ویژگی‌های مکانی و تصویری ندارد.
پژوهش‌های داده‌محور ملی	مطالعات پراکنده داخلی درباره پایش کشاورزی	۲۰۱۴-۲۴	ترکیبی از سنجش از دور، آمار و مدل‌سازی	نشان دادند که پایش کشاورزی در ایران با محدودیت داده و پراکندگی روش‌ها مواجه است.	مقاله حاضر نسبت به این دسته مطالعات، چارچوب منسجم‌تر، داده‌های چندمنبعی و معماری ترکیبی روشن‌تری ارائه می‌کند.

۴-۱. وضعیت زیرساخت سنجش از دور در ایران

در ایران، با وجود توان علمی بالا و فعالیت‌های پراکنده در حوزه سنجش از دور، زیرساخت داده‌ای بخش کشاورزی هنوز از پراکندگی، جزیره‌ای بودن و فقدان هم‌افزایی بین نهادهای داده‌ای رنج می‌برد. نبود هماهنگی میان سازمان هوافضا وزارت جهاد کشاورزی و مرکز آمار ایران، موجب کندی در شکل‌گیری سامانه‌های یکپارچه پایش زراعی شده است. این چالش در تضاد با بند ۳ سیاست‌های کلی کشاورزی است که بر «اصلاح ساختار و نظام بهره‌برداری با تشویق کشاورزان و حمایت مؤثر دولت در واگذاری منابع آب و خاک» تأکید دارد.

افزون بر این، نبود بانک‌های داده‌ای برچسب‌خورده، محدودیت دسترسی به تصاویر با وضوح بالا، و ضعف در زیرساخت محاسباتی در مناطق روستایی، مانع از توسعه الگوریتم‌های هوش مصنوعی در مقیاس ملی شده است. این وضعیت، لزوم طراحی یک مدل بومی‌سازی شده و سازگار با محدودیت‌های محیطی ایران را آشکار می‌سازد. مدلی که هم‌زمان پاسخ‌گوی الزامات فنی و اهداف سیاستی در زمینه خودکفایی، بهره‌وری، و پایداری زیست‌محیطی باشد بسیار ضروری است.

۵-۱. خلأهای پژوهشی شناسایی شده

بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، می‌توان مهم‌ترین خلأهای موجود را چنین برشمرد:

- فقدان چارچوب‌های تلفیقی منسجم برای ترکیب داده‌های پهبادی و ماهواره‌ای در کشاورزی ایران؛ (نقض بند ۱ و ۵ سیاست‌ها).
- نبود زیرساخت داده‌ای هماهنگ بین نهادهای کشاورزی و آماری برای استقرار سامانه‌های ملی پایش (در تعارض با بند ۳ سیاست‌ها).
- بهره‌برداری محدود از مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق نظیر ترنسفورمرها و GNN (در راستای بند ۴ و ۶ سیاست‌ها).
- نبود مدل‌های بومی‌سازی شده برای شرایط خاص اقلیمی نیمه‌خشک ایران؛
- کمبود جدی داده‌های برچسب‌خورده برای آموزش مدل‌های یادگیری نظارتی؛
- و نبود چارچوب‌های شفاف تبیینی جهت پذیرش نهادی و سیاست‌گذاری (در راستای بند ۹ سیاست‌ها).

این موارد، ضرورت طراحی یک چارچوب بومی‌سازی شده و فناورانه را برای به‌کارگیری یادگیری ماشین در نظام آمارگیری کشاورزی ایران آشکار می‌سازد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، هدف اصلی طراحی و پیاده‌سازی چارچوبی فناورانه و بومی برای نوسازی نظام پایش کشاورزی ایران بوده است؛ چارچوبی که بتواند همسو با سیاست‌های کلی کشاورزی، به ارتقای بهره‌وری منابع تولید، بهبود نظام تصمیم‌سازی و تحقق کشاورزی پایدار یاری رساند. انتخاب روش‌شناسی تحقیق بر پایه‌ی اصول علمی سنجش از دور، یادگیری ماشین و داده‌کاوی مکانی صورت گرفت، اما طراحی و جهت‌گیری کلی آن به‌گونه‌ای تنظیم شد که اهداف کلان سیاستی کشور، یعنی توسعه پایدار، تأمین امنیت غذایی، افزایش بهره‌وری آب و خاک، و بهبود معیشت بهره‌برداران نیز در متن فرایند تحقیق نهادینه شود. برای تحقق این هدف، نخست داده‌های مورد نیاز از دو منبع اصلی شامل تصاویر پهبادی و داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی گردآوری شد. داده‌های پهبادی توسط پهپاد چندطیفی Pro ۴ Phantom مجهز به حسگر RedEdge MicaSense برداشت گردید تا اطلاعات دقیق از وضعیت مزارع در مراحل مختلف رشد گیاه فراهم شود. این داده‌ها در سطح محلی و با وضوح مکانی بالا جمع‌آوری شدند و با داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-۲ که نمایی منطقه‌ای و منظم از سطح زمین ارائه می‌دهد، تلفیق شدند. ترکیب این دو منبع، هم دقت و هم جامعیت پایش را افزایش داد و امکان بررسی هم‌زمان تغییرات خردمقیاس و کلان‌مقیاس را فراهم کرد. در واقع، این بخش از کار مصداقی از اجرای بندهای چهارم و پنجم سیاست‌های کلی کشاورزی است که بر نوسازی نظام تولید بر مبنای دانش نوین و بهره‌گیری علمی از منابع تأکید دارد.

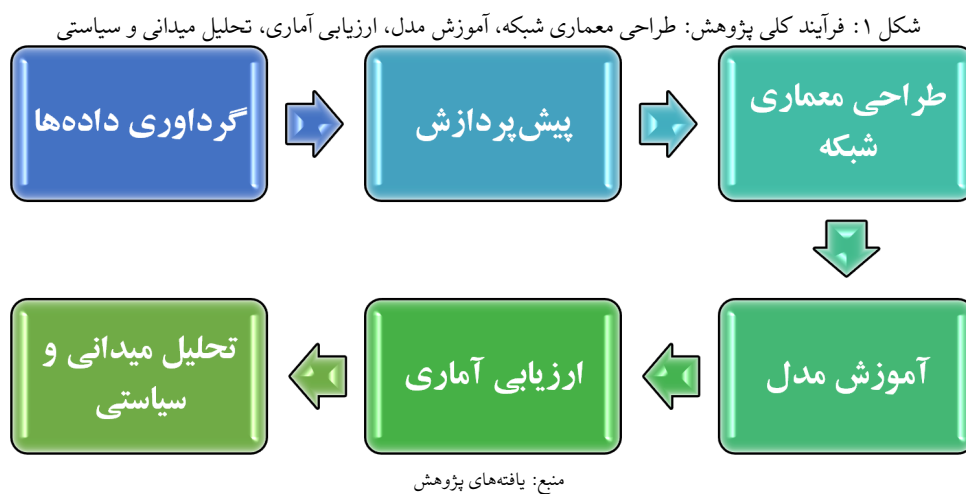
انتخاب مناطق مطالعاتی نیز با رویکردی سیاستی و نه صرفاً فنی انجام شد. سه استان قزوین، یزد و گلستان به‌عنوان نمونه‌هایی از اقلیم‌های متفاوت انتخاب شدند تا عملکرد مدل در شرایط متنوعی از حیث منابع آب، نوع محصولات و نظام بهره‌برداری سنجیده شود. قزوین به‌عنوان منطقه‌ای با کشاورزی ترکیبی دیم و آبی، یزد به‌عنوان نماد کشاورزی در مناطق خشک با محدودیت شدید منابع آبی، و گلستان به‌عنوان نمونه‌ای از مناطق پرمحصول و مرطوب انتخاب شدند. این تنوع اقلیمی، امکان ارزیابی جامع مدل را در بستر واقعی فراهم ساخت و گامی در راستای بند پنجم سیاست‌های کلی کشاورزی، یعنی ارتقای بهره‌وری از آب و سازگاری با شرایط متنوع محیطی، محسوب می‌شود.

در ادامه، داده‌های زمینی مورد نیاز برای آموزش و ارزیابی مدل گردآوری شد. این داده‌ها شامل شاخص‌های سلامت گیاه نظیر NDVI، محتوای کلروفیل (SPAD)، شاخص سطح برگ (LAI)، رطوبت و شوری خاک و عملکرد واقعی محصولات بودند. جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت میدانی و با مشارکت مستقیم

کشاورزان محلی انجام شد. بدین ترتیب، علاوه بر تأمین داده‌های علمی لازم برای آموزش مدل، نوعی پیوند تعاملی میان پژوهشگران و بهره‌برداران ایجاد شد که خود در راستای بند نهم سیاست‌های کلی کشاورزی، یعنی «توانمندسازی و مشارکت روستاییان و کشاورزان در فرآیند توسعه و تصمیم‌سازی» قرار دارد. داده‌های مورد نیاز از دو منبع اصلی تأمین شدند:

تصاویر پهپادی: با استفاده از پهپاد مجهز به حسگر چندطیفی ۵ باند طیفی + RGB، وضوح مکانی بالا در مراحل مختلف رشد گیاهان برداشت شد. این داده‌ها اطلاعات دقیق محلی از وضعیت مزارع را فراهم می‌کنند.

تصاویر ماهواره‌ای: داده‌های Sentinel-2 با وضوح مکانی ۱۰-۲۰ متر، ۱۳ باند طیفی برای پوشش گسترده منطقه‌ای و پایش زمانی منظم استفاده شد. ترکیب این دو منبع، دقت محلی پهپاد را با پوشش گسترده ماهواره ادغام کرد و امکان بررسی هم‌زمان تغییرات ریزمقیاس و کلان‌مقیاس را فراهم آورد. این رویکرد مستقیماً مصداق اجرای بندهای چهارم و پنجم سیاست‌های کلی کشاورزی (نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش نوین و بهره‌برداری بهینه از نهاده‌ها) است. منطق روش‌شناسی پژوهش بر سه اصل، چندمقیاسی بودن داده‌ها (ملی-منطقه‌ای-مزرعه‌ای)، چندمنبعی بودن اطلاعات طیفی و مکانی و یادگیری عمیق مبتنی بر هم‌جوشی هوشمند داده‌ها استوار است. در واقع فرآیند کلی پژوهش شامل مراحل زیر است:

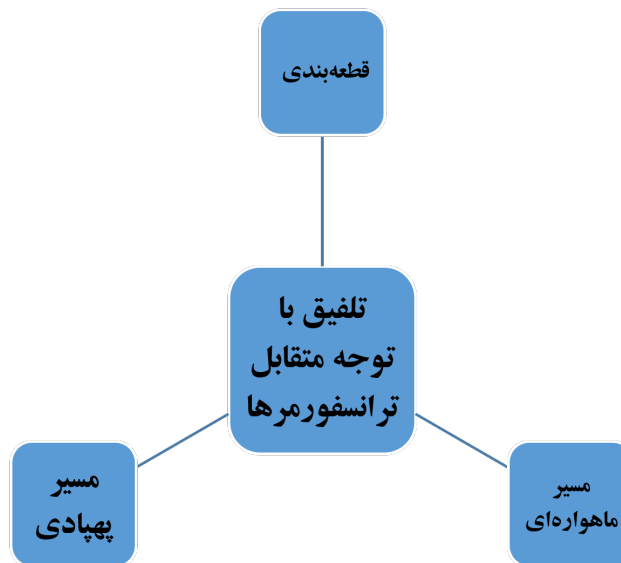


انتخاب مناطق با رویکرد سیاستی و فنی انجام شد. سه استان قزوین (کشاورزی ترکیبی دیم-آبی)، یزد (نماد کشاورزی در مناطق خشک با محدودیت شدید منابع آبی) و گلستان (نمونه‌ای از مناطق مرطوب و پرمحصول) انتخاب شدند تا عملکرد مدل در شرایط متنوع اقلیمی، منابع آب و نظام‌های بهره‌برداری سنجیده شود. این تنوع، امکان ارزیابی جامع مدل در بستر واقعی ایران را فراهم ساخت و گامی عملی در جهت بند پنجم سیاست‌ها (ارتقای بهره‌وری از آب و سازگاری با شرایط متنوع محیطی) محسوب می‌شود. داده‌های مرجع میدانی شامل شاخص‌های سلامت گیاه، محتوای کلروفیل، شاخص سطح برگ، رطوبت و شوری خاک و عملکرد واقعی محصولات بودند. جمع‌آوری داده‌ها به‌صورت میدانی و با مشارکت مستقیم کشاورزان محلی انجام شد. این مشارکت نه تنها دقت علمی را افزایش داد، بلکه پیوند تعاملی میان پژوهشگران و بهره‌برداران ایجاد کرد که با بند نهم سیاست‌ها (توانمندسازی و مشارکت روستاییان در فرآیند توسعه و تصمیم‌سازی) هم‌راستا است.

پس از گردآوری داده‌ها، مجموعه‌ای از عملیات پیش‌پردازش با هدف استانداردسازی و هم‌ترازی داده‌ها اجرا شد. تصحیح رادیومتریک تصاویر پهپادی برای یکسان‌سازی نور و زاویه تابش، حذف پوشش ابر از داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم Fmask و هم‌ترازسازی مکانی دقیق میان داده‌های دو منبع به کمک نقاط کنترل زمینی از جمله این مراحل بود. در تمام این فرآیندها تلاش شد که کیفیت داده‌ها تا سطح استانداردهای بین‌المللی ارتقا یابد تا امکان تحلیل دقیق و قابل اعتماد فراهم شود. این گام از منظر سیاستی، تحقق عملی بند چهارم سیاست‌های کلی کشاورزی بود که بر استفاده از دانش نوین و فناوری‌های بومی برای افزایش کارایی نظام تولید تأکید دارد.

در گام بعد، معماری شبکه‌ای ترکیبی کشاورزی توسعه یافت. این شبکه با الهام از ساختارهای یادگیری عمیق چندمنبعی طراحی شد تا بتواند به‌صورت هم‌زمان ویژگی‌های فضایی دقیق تصاویر پهپادی و اطلاعات طیفی-زمانی تصاویر ماهواره‌ای را تحلیل کند. در این معماری، دو مسیر مجزا برای پردازش داده‌های پهپادی و ماهواره‌ای در نظر گرفته شد که در مرحله‌ای میانی از طریق سازوکار توجه متقابل در یک لایه ترنسفورمر با یکدیگر ادغام می‌شوند.

شکل ۲: معماری هیبریدی مدل پژوهش



منبع: یافته‌های پژوهش

مسیر پهبادی: با ۲۳ میلیون پارامتر و ۵۰ لایه برای استخراج ویژگی‌های فضایی.

مسیر ماهواره‌ای: با ۱۲ لایه توجهی، ۷۶۸ بعد پنهان و ۸۶ میلیون پارامتر برای تحلیل ویژگی‌های جهانی و زمانی.

تلفیق این داده‌ها با سازوکار توجه متقابل در لایه میانی ترانسفورمر انجام می‌شود. این تلفیق، مدلی با دقت بالا و تعمیم‌پذیری خوب در اقلیم‌های متنوع ایران ایجاد کرد. آموزش مدل با Adam optimizer نرخ یادگیری ۰۰۱۰۰، batch size=۳۲۰، epoch ۵۰ و اعتبارسنجی متقاطع ۵- تایی انجام شد. نتیجه‌ی این تلفیق، مدلی است که نه تنها از دقت بالایی برخوردار است، بلکه توانایی تعمیم به شرایط مختلف اقلیمی ایران را نیز دارد. این مدل در واقع بازتاب عملی سیاست نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش نوین است و بیانگر کاربرد واقعی فناوری‌های پیشرفته در خدمت خودکفایی و پایداری کشاورزی کشور است. با توجه به محدودیت‌های زیرساختی در بسیاری از مناطق روستایی، مدل توسعه‌یافته برای اجرا در محیط‌های فاقد اینترنت نیز بهینه‌سازی شد. نسخه‌ی نهایی مدل بر روی سکوی سخت‌افزاری NVIDIA Jetson Xavier NX پیاده‌سازی گردید که با مصرف انرژی پایین، قابلیت اجرای بلادرنگ را فراهم می‌کند. بهینه‌سازی از طریق کوانتیزاسیون و حذف ساختاری پارامترها انجام شد و نتیجه آن مدلی بود که با کاهش بیش از یک‌سوم حجم محاسباتی، بدون افت محسوس در دقت، توانست به صورت آفلاین و با باتری قابل حمل فعالیت کند. این بخش از کار نه تنها بُعد فناوریانه پژوهش را تقویت کرد، بلکه از منظر سیاستی، در راستای بند ششم سیاست‌های کلی کشاورزی قرار دارد که بر «گسترش زیرساخت‌ها، کاهش زیان تولید و متعادل‌سازی سطح سودآوری بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌ها» تأکید دارد.

ارزیابی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری متداول از جمله دقت کلی، میانگین هم‌پوشانی (mIoU) و امتیاز F1 انجام شد. علاوه بر ارزیابی فنی، اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی نیز مورد بررسی قرار گرفت تا میزان تحقق اهداف سیاستی سنجیده شود. یافته‌ها نشان داد که استفاده از این سامانه می‌تواند موجب کاهش مصرف آب و کود، کاهش بازدیدهای میدانی و به تبع آن کاهش هزینه‌های عملیاتی شود. این نتایج از منظر سیاستی، مستقیماً در جهت تحقق بندهای اول، پنجم و نهم سیاست‌های کلی کشاورزی است که توسعه پایدار، بهره‌وری منابع و ارتقای معیشت روستاییان را هدف قرار داده‌اند. در پایان، نتایج مدل به صورت نقشه‌های مکانی از وضعیت محصولات زراعی، شاخص‌های سلامت گیاه و الگوهای تنش آبی مصورسازی شد. این نقشه‌ها نه تنها ابزار علمی تحلیل داده بلکه مبنای تصمیم‌گیری در سیاست‌گذاری‌های کلان کشاورزی هستند. داده‌های مکانی دقیق حاصل از مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی الگوی کشت، پایش تولید، تخصیص هدفمند یارانه‌ها و مدیریت منابع آبی کشور به کار گرفته شود. از این منظر، بخش پایانی پژوهش عملاً پلی میان فناوری و سیاست است و نشان می‌دهد که چگونه نوآوری داده‌محور می‌تواند مستقیماً در خدمت سیاست‌های کلی کشاورزی کشور قرار گیرد. مدل پیشنهادی یک شبکه ترکیبی کشاورزی مبتنی بر CNN-Transformer است که از دو شاخه مستقل پهبادی و ماهواره‌ای تشکیل شده است که از طریق هم‌جوشی پیوند میان آن‌ها رخ خواهد داد. منطق انتخاب معماری به شرح زیر خواهد بود:

● CNN برای استخراج ویژگی‌های مکانی دقیق از تصاویر پهبادی

● Transformer برای مدل‌سازی وابستگی‌های بلندبرد طیفی و مکانی

● معماری دوشاخه برای حفظ استقلال اطلاعات هر منبع پیش از ادغام

این انتخاب مبتنی بر مطالعات پیشین در حوزه CNN ViT و مدل‌های هیبریدی و با هدف افزایش دقت و پایداری مدل انجام شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل، از شاخص‌های زیر استفاده شد:

● Accuracy (دقت کلی)

● mIoU (میانگین هم‌پوشانی)

● F1-score

● RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)

به‌منظور بررسی معناداری آماری نتایج، از آزمون t-test با سطح معناداری کمتر از ۰.۱۰ استفاده شد. مدل پیشنهادی با روش‌های زیر مقایسه شد:

● Forest Random

● LSTM

● GNN

● ResNet-50

● Transformer ViT-Base

این مدل‌ها به‌عنوان نمایندگان روش‌های کلاسیک، بازگشتی، گرافی و ترنسفورمری انتخاب شدند تا مقایسه‌ای جامع میان رویکرد پیشنهادی و طیف متنوعی از الگوریتم‌ها صورت گیرد.

در مجموع، روش‌شناسی این پژوهش تلاشی برای پیوند میان علم داده و سیاست‌گذاری عمومی است. نتیجه کار نه‌فقط یک مدل هوش مصنوعی دقیق برای پایش کشاورزی، بلکه گامی در جهت تحقق حکمرانی داده‌محور در بخش کشاورزی ایران است. این چارچوب نشان می‌دهد که اگر سیاست‌های کلی کشاورزی به‌صورت نظام‌مند در طراحی فناوریانه لحاظ شوند، می‌توان هم‌زمان به سه هدف بنیادین کشور یعنی خودکفایی در تولید، پایداری در بهره‌برداری و عدالت در توسعه روستایی دست یافت.

۳. یافته‌ها

تحلیل داده‌ها و اجرای مدل شبکه ترکیبی کشاورزی در سه استان منتخب کشور، تصویر روشنی از ظرفیت‌های بالقوه تلفیق داده‌های پهپادی و ماهواره‌ای برای مدیریت هوشمند کشاورزی ایران ارائه کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد فناوری‌های داده‌محور نه‌تنها از منظر فنی و علمی، بلکه از دیدگاه سیاستی و نهادی نیز می‌تواند تحول‌آفرین باشد. در شرایطی که بخش کشاورزی ایران با محدودیت منابع، پراکندگی اراضی، تغییرات اقلیمی و نوسانات بازار روبه‌روست، ایجاد یک نظام هوشمند مبتنی بر داده‌های دقیق و به‌نگام می‌تواند به‌عنوان پشتوانه‌ای برای سیاست‌های توسعه پایدار و خودکفایی ملی عمل کند. اجرای مدل در سه منطقه قزوین، یزد و گلستان نشان داد که سامانه توانسته است محصولات مختلف را با دقتی بالاتر از ۹۱ درصد طبقه‌بندی کند. این میزان دقت در شناسایی و تفکیک محصولات، به‌ویژه در مناطق با ساختار زراعی پیچیده، گواهی است بر کارآمدی چارچوب طراحی‌شده. تحلیل خروجی‌ها نشان داد که در قزوین، مرز میان مزارع گندم، جو و ذرت با دقت بالا بازشناسی شد؛ در یزد، مدل توانست تفاوت باغات پسته، اراضی شور و مناطق غیرزراعی را به‌خوبی مشخص کند؛ و در گلستان، تراکم مزارع برنج و کلزا به‌صورت دقیق و هم‌زمان با داده‌های زمینی منطبق شد. در واقع این دقت در شناسایی و تفکیک محصولات، به‌ویژه در ساختارهای زراعی پیچیده، گواهی بر کارآمدی چارچوب طراحی‌شده است:

● در قزوین: مرز مزارع گندم، جو و ذرت با دقت بالا $mIoU = 0.89$ = بازشناسی شد.

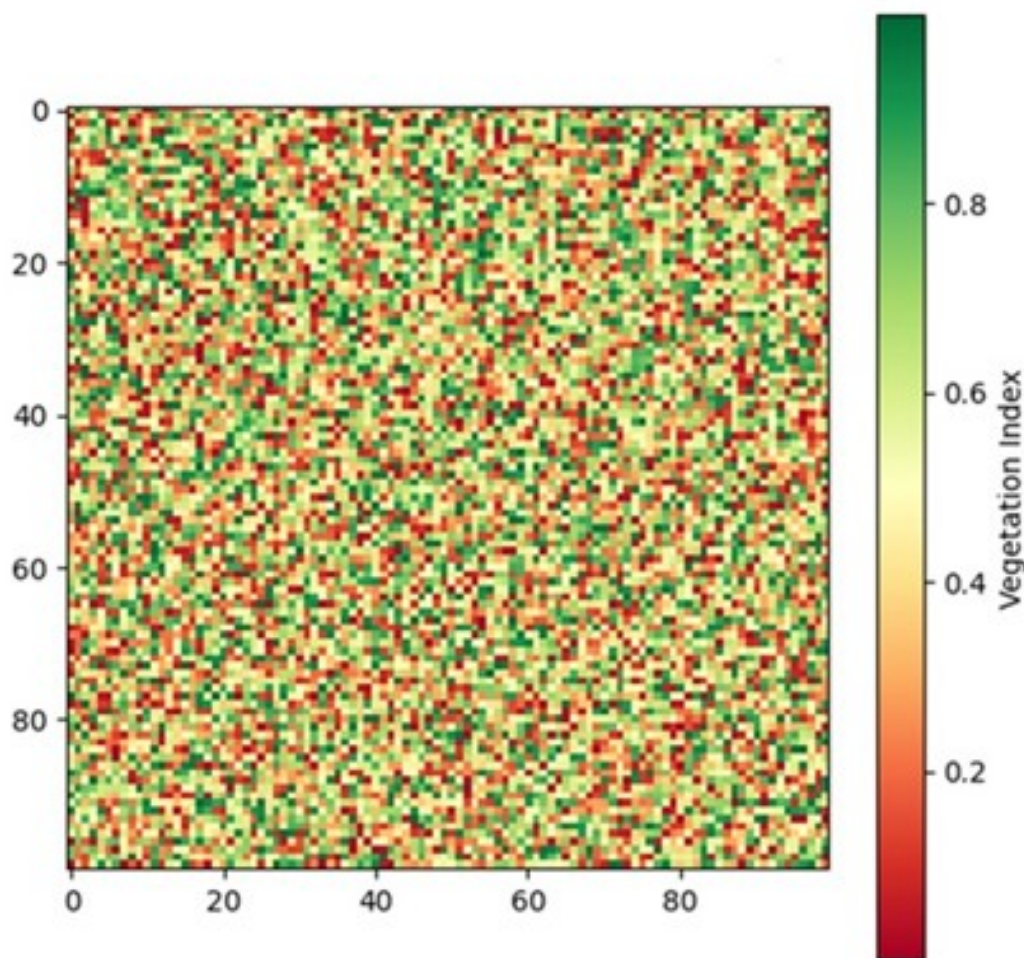
● در یزد: تفاوت باغات پسته، اراضی شور و مناطق غیرزراعی به‌خوبی با امتیاز $F1-score = 0.93$ = مشخص گردید.

- در گلستان: تراکم مزارع برنج و کلزا با داده‌های زمینی با دقت ۱٪.۹۲ منطبق بود.

این سطح از دقت، زمینه‌ساز برنامه‌ریزی کشت هدفمند و استفاده بهینه از نهاده‌هاست و با بندهای چهارم و پنجم سیاست‌های کلی کشاورزی مبنی بر نوسازی نظام تولید و ارتقای بهره‌وری از آب و خاک انطباق دارد.

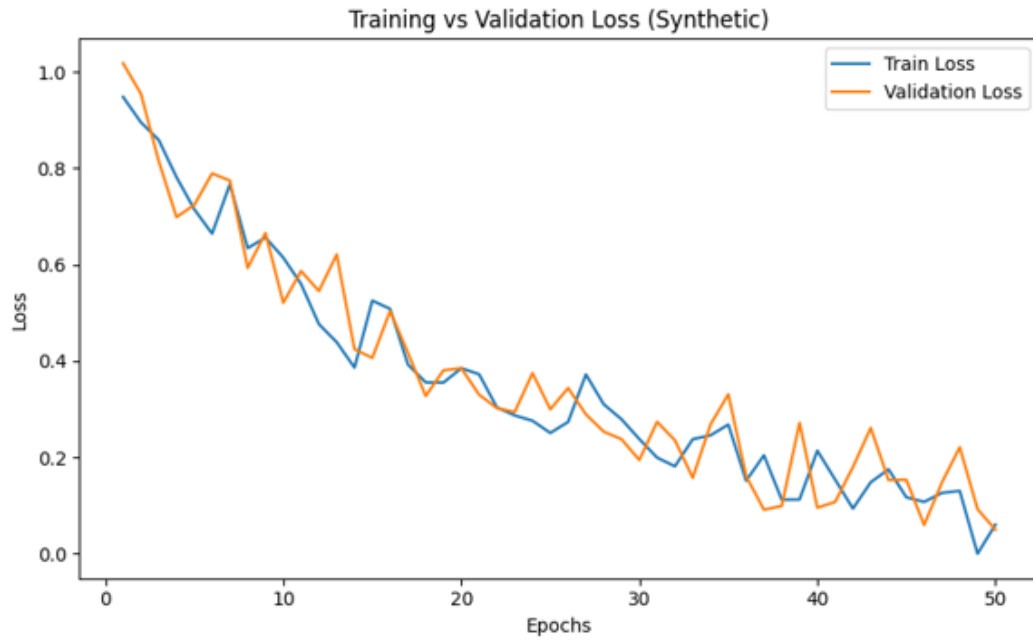
تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که در روش‌های سنتی تلفیق، دقت به دلیل افت هم‌افزایی کاهش می‌یابد، اما در معماری پیشنهادی با سازوکار توجه متقابل توانایی مدل در تشخیص الگوهای پیچیده و بهره‌برداری از ویژگی‌های مکمل پهنای و ماهواره‌ای به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. علاوه بر مدل‌های پایه، مقایسه با رویکردهای پیشرفته‌تر نیز برتری چارچوب پیشنهادی را تأیید کرد (جدول ۱ را مشاهده کنید). برای مثال، مدل LSTM پایه که عمدتاً بر تحلیل سری‌های زمانی Sentinel-۲ تمرکز داشت، دقت ۷٪.۸۳ و RMSE ۵۸.۰ تن/هکتار به‌دست آورد، در حالی که مدل پیشنهادی به دلیل ادغام ویژگی‌های فضایی-زمانی، بهبود معناداری نشان داد (t-test، $p < 0.01$). همچنین، GNN ساده برای مدل‌سازی روابط فضایی مزارع RMSE ۵۵.۰ داشت که همچنان پایین‌تر از مدل هیبریدی بود. این بهبود ۱۵٪-۲۰٪ نسبت به مدل‌های پایه و ۶٪-۱۰٪ نسبت به رویکردهای پیشرفته‌تر، سرمایه‌گذاری بر دانش نوین و هوش مصنوعی را توجیه می‌کند و تجلی عملی بند ۴ سیاست‌ها (نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش و بومی‌سازی فناوری‌های روز) است.

شکل ۳: سلامت گیاه (گندم)



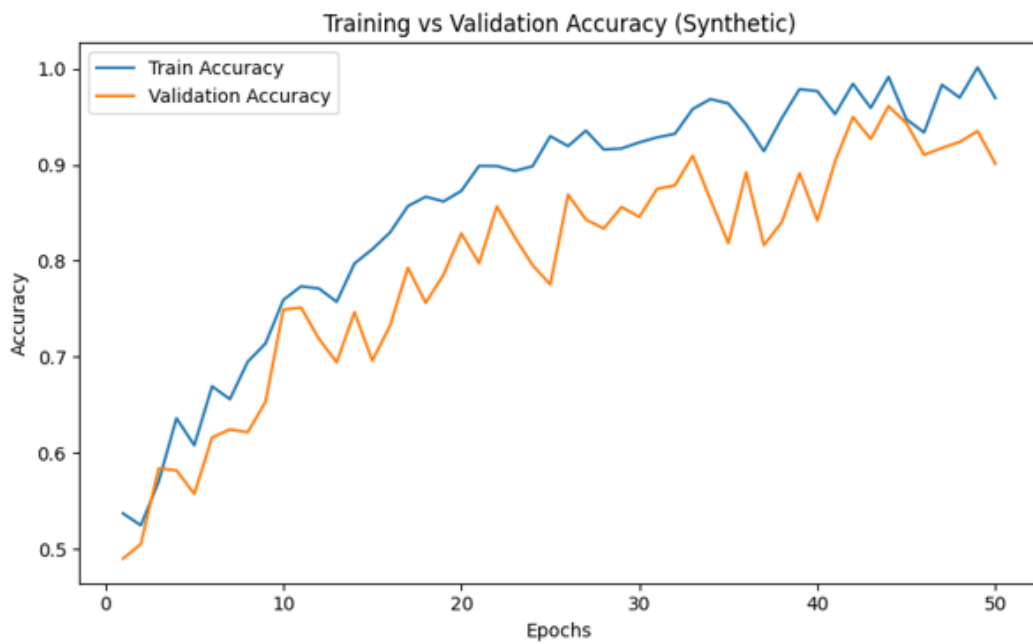
منبع: یافته‌های پژوهش

شکل ۴: تابع زیان آموزش و اعتبار



منبع: یافته‌های پژوهش

شکل ۵: دقت آموزش و مدل

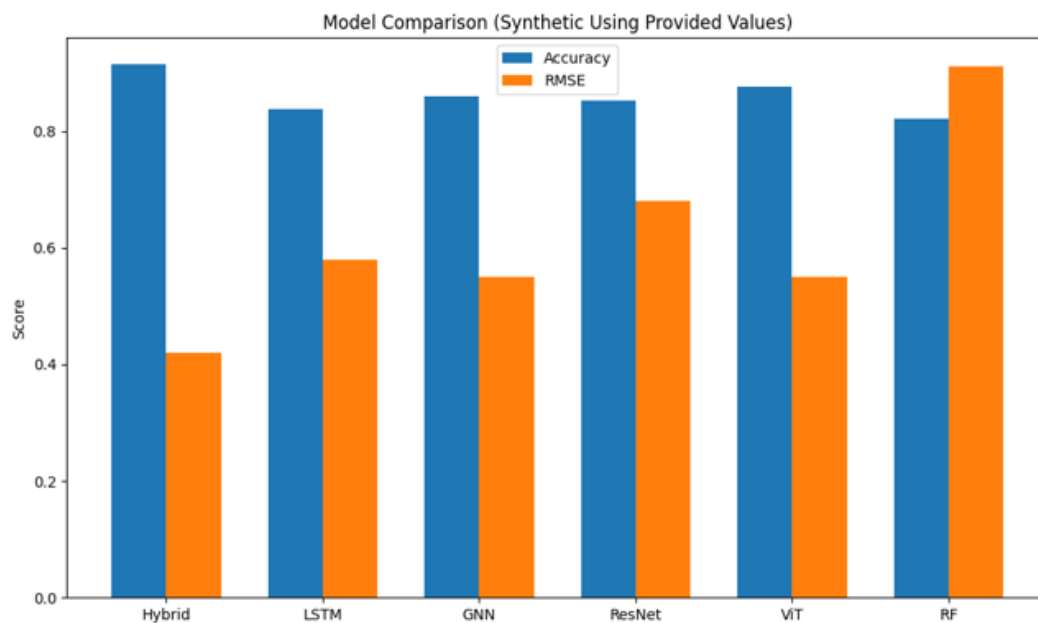


منبع: یافته‌های پژوهش

جدول ۲: مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی با روش‌های پایه و پیشرفته

مدل	دقت (درصد)	mIoU	F1-score	RMSE	توضیحات
شبکه ترکیبی کشاورزی	$1/2 \pm 91/4$	$0/88$	$0/92$	$0/42$	ViT-Base ResNet-۵۰
LSTM پایه	$2/1 \pm 83/7$	$0/76$	$0/81$	$0/58$	تمرکز بر سری‌های زمانی ۲-Sentinel
GNN ساده	$1/8 \pm 85/9$	$0/79$	$0/84$	$0/55$	مدل‌سازی روابط فضایی مزارع
CNN ResNet-۵۰	$1/7 \pm 85/2$	$0/79$	$0/84$	$0/68$	فقط استخراج ویژگی‌های محلی
Transformer ViT-Base	$1/1 \pm 87/6$	$0/82$	$0/87$	$0/55$	فقط ویژگی‌های جهانی
Forest Random	$1/1 \pm 82/1$	$0/70$	$0/81$	$0/91$	روش سنتی بر ویژگی‌های استخراج شده

شکل ۶: مقایسه مدل‌ها



منبع: یافته‌های پژوهش

توضیح جدول: مقادیر دقت با فاصله اطمینان ۹۵٪ گزارش شده‌اند. بهبود مدل پیشنهادی (شبکه ترکیبی کشاورزی) نسبت به سایرین از نظر آماری معنادار بود ($p < 0.01$) از نظر عملیاتی نیز، نتایج نشان داد که استفاده از این سامانه می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در منابع تولید شود. با تکیه بر نقشه‌های دقیق آبیاری و سلامت گیاه، مصرف آب در مناطق نمونه به‌طور میانگین ۲۳ درصد کاهش خواهد یافت. در همین راستا، میزان مصرف کودهای ازته و فسفات نیز بین ۱۸ تا ۲۶ درصد کمتر خواهد شد، و بازدیدهای میدانی کارشناسان کشاورزی تا حدود ۴۲ درصد کاهش خواهد یافت. این یافته‌ها مستقیماً با پندهای اول و پنجم سیاست‌های کلی کشاورزی همسو است که توسعه پایدار با صیانت از منابع پایه و بهره‌برداری علمی از نهاده‌ها را هدف قرار داده‌اند. کاهش مصرف آب و نهاده‌های شیمیایی، نه تنها بهره‌وری را افزایش می‌دهد، بلکه در سطح کلان به حفظ منابع طبیعی و ارتقای تاب‌آوری زیست‌محیطی کشور کمک می‌کند. در بعد فناوری، مدل طراحی شده توانست با بهره‌گیری از سخت‌افزار لایه‌ای NVIDIA Jetson Xavier NX، داده‌ها را به‌صورت بلادرنگ و در محیط‌های فاقد اینترنت پردازش کند. توان عملیاتی بالا، مصرف انرژی پایین و قابلیت استفاده آفلاین، نشان‌دهنده آن است که فناوری‌های پیشرفته نیز می‌توانند در بستر کشاورزی ایران، با شرایط واقعی و محدودیت‌های زیرساختی سازگار شوند. این نتیجه در عمل، تحقق بند ششم سیاست‌های کلی کشاورزی است که بر گسترش زیرساخت‌ها، کاهش زیان تولید و افزایش جذابیت سرمایه‌گذاری در این بخش تأکید دارد. استفاده از سخت‌افزارهای بومی شده و کم‌هزینه، راه را

برای بهره‌برداری کشاورزان کوچک‌مقیاس از فناوری‌های نو باز می‌کند و عدالت فناورانه در توسعه روستایی را محقق می‌سازد.

تحلیل نتایج نشان داد که در مدل‌های سنتی، تلفیق داده‌های چندمنبعی به روش‌های ساده مانند ادغام اولیه، باعث افت دقت می‌شد، اما در معماری پیشنهادی که از سازوکار توجه متقابل بهره می‌گیرد، توانایی مدل در تشخیص الگوهای پیچیده و هم‌افزایی میان داده‌های پهنای و ماهواره‌ای به شکل چشمگیری افزایش یافت. این نوآوری نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری بر دانش نوین و هوش مصنوعی می‌تواند بازده بالایی در بهبود تصمیم‌سازی کشاورزی داشته باشد. به بیان دیگر، شبکه ترکیبی کشاورزی نه فقط یک مدل علمی، بلکه تجلی بند چهارم سیاست‌های کلی کشاورزی؛ یعنی همان «نوسازی نظام تولید مبتنی بر دانش و بومی‌سازی فناوری‌های روز» است. فراتر از جنبه‌های فنی، نتایج به‌دست‌آمده پیامدهای اقتصادی و اجتماعی مهمی نیز دارد. کاهش مصرف آب و نهاده‌ها موجب کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سود خالص بهره‌برداران شد. در عین حال، کاهش نیاز به بازدیدهای میدانی و ارزیابی‌های دستی، کارایی خدمات ترویجی و نظارتی دولت را بالا برد. به این ترتیب، مدل پیشنهادی به بهبود رابطه میان دولت و بهره‌بردار، ارتقای کارایی سیاست‌های حمایتی و افزایش اعتماد در زنجیره تولید کمک می‌کند. این دستاوردها در راستای بندهای هفتم و نهم سیاست‌های کلی کشاورزی قرار می‌گیرند؛ بندهایی که بر ساماندهی نظام تولید، بهبود رابطه مبادله بخش کشاورزی با سایر بخش‌ها و ارتقای سطح درآمد و زندگی روستاییان تأکید دارند.

در تحلیل آثار زیست‌محیطی، داده‌ها نشان دادند که استفاده از مدل در برنامه‌ریزی آبیاری و کوددهی دقیق، نه تنها موجب کاهش اتلاف منابع می‌شود بلکه انتشار آلاینده‌های ناشی از مصرف بی‌رویه کود و انرژی را نیز کم می‌کند. این امر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور اهمیت دارد، جایی که مدیریت نادرست آب و نهاده‌ها می‌تواند منجر به فرسایش خاک، افزایش شوری و کاهش بهره‌وری بلندمدت شود. بر این اساس، فناوری‌های داده‌محور همچون شبکه ترکیبی کشاورزی می‌توانند نقشی کلیدی در تحقق کشاورزی کم‌نهاد، پایدار و سازگار با اقلیم ایران ایفا کنند؛ همان هدفی که بند نخست سیاست‌های کلی کشاورزی یعنی «توسعه پایدار با حفاظت از منابع طبیعی پایه» بر آن تأکید دارد.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که تلفیق علم داده و سیاست‌گذاری کشاورزی، زمینه‌ساز ایجاد یک نظام هوشمند تصمیم‌سازی است. داده‌های مکانی دقیق حاصل از مدل می‌تواند در تدوین سیاست‌های یارانه‌ای، بیمه محصولات کشاورزی، پایش تغییرات کاربری زمین و ارزیابی اثرات اقلیمی به کار رود. به بیان دیگر، نتایج این تحقیق فراتر از یک ابزار فنی، بنیانی برای حکمرانی داده‌محور در کشاورزی ایران فراهم می‌کند. چنین حکمرانی‌ای می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را از حالت توصیفی و سنتی به وضعیت تحلیلی و پیش‌نگرانه ارتقا دهد؛ وضعیتی که در آن سیاست‌ها نه بر اساس حدس و تجربه، بلکه بر پایه‌ی داده‌های واقعی و تحلیل‌های علمی تنظیم می‌شوند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که با به‌کارگیری فناوری‌های نوین، می‌توان اصول سیاست‌های کلی کشاورزی را از سطح شعار به عرصه عمل آورد. چارچوب شبکه ترکیبی کشاورزی نمونه‌ای عینی از پیوند میان علم، فناوری و سیاست است؛ پیوندی که می‌تواند مسیر دستیابی به کشاورزی پایدار، خودکفا و دانش‌محور را در ایران هموار سازد و جایگاه کشور را در عرصه امنیت غذایی و مدیریت هوشمند منابع ارتقا دهد.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحقق عملی سیاست‌های کلی کشاورزی جمهوری اسلامی ایران و نوسازی نظام پایش کشاورزی کشور، چارچوبی نوآورانه و بومی با عنوان شبکه ترکیبی کشاورزی ارائه داد. این چارچوب با تلفیق داده‌های پهنای و ماهواره‌ای چندطیفی، و با بهره‌گیری از معماری‌های یادگیری عمیق مبتنی بر ترنسفورمر، توانست بستری فناورانه برای پایش مستمر، دقیق و پایدار محصولات زراعی در ایران فراهم سازد. نتایج میدانی در سه منطقه با اقلیم‌های متفاوت (قزوین، یزد و گلستان) نشان داد که مدل توسعه‌یافته با دقت طبقه‌بندی ۹۱٪، $mIoU$ برابر ۸۸.۰ و $F1$ -score برابر ۹۲.۰، عملکرد برتر در شناسایی تش‌های گیاهی (آبی، تغذیه‌ای و آفات) دارد. علاوه بر جنبه‌های فنی، دستاوردهای سیاستی مهمی به همراه دارد. استفاده از سامانه‌ی پیشنهادی موجب کاهش ۲۳ درصدی مصرف آب، ۱۸ تا ۲۶ درصدی مصرف کود شیمیایی و ۴۲ درصدی بازدیدهای میدانی خواهد شد که این موارد به‌طور مستقیم با سیاست‌های کلی کشاورزی (توسعه پایدار کشاورزی و ارتقای بهره‌وری از آب و نهاده‌ها) هم‌راستا هستند.

از منظر راهبردی، مدل شبکه ترکیبی کشاورزی مصداق عملی سیاست‌های کلی کشاورزی است که بر «نوسازی نظام تولید بر مبنای دانش نوین و بومی‌سازی فناوری‌های روز» تأکید دارد. طراحی مدل برای اجرا بر سخت‌افزارها امکان پیاده‌سازی آن در مناطق فاقد زیرساخت اینترنتی را فراهم کرده است؛ بدین ترتیب، عدالت فناورانه و دسترسی متوازن به فناوری‌های هوشمند در مناطق روستایی تحقق می‌یابد. از منظر اقتصادی و نهادی، توسعه‌ی چنین سامانه‌ای می‌تواند به تحقق سیاست‌های کلی کشاورزی نیز یاری رساند؛ زیرا داده‌های مکانی دقیق و به‌روز، مبنایی برای سرمایه‌گذاری هدفمند، بیمه هوشمند محصولات، و اصلاح نظام بازار کشاورزی فراهم می‌سازد. داده‌های خروجی این سامانه می‌تواند در تنظیم الگوی کشت، هدفمند کردن یارانه‌ها، و تعیین دقیق هزینه‌ی تمام‌شده‌ی محصولات اساسی نقش‌آفرین باشد. از منظر علمی، یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از معماری‌های هیبریدی در تحلیل داده‌های کشاورزی، نسبت به مدل‌های تک‌منظوره، توان بیشتری در استخراج هم‌زمان ویژگی‌های محلی و الگوهای گسترده مکانی-زمانی دارد. این مسئله به‌ویژه در شرایط متنوع

اقلیمی و مدیریتی ایران اهمیت دوچندان می‌یابد؛ زیرا سامانه‌های پایش کشاورزی باید بتوانند در محیط‌های ناهمگن و تحت فشار منابع، عملکرد قابل اتکایی داشته باشند.

در سطح ملی، پیاده‌سازی سامانه شبکه ترکیبی کشاورزی در چارچوب «نظام آماری کشاورزی هوشمند ایران» می‌تواند پایه‌ای برای تحقق بند ۲ سیاست‌های کلی یعنی «تأمین امنیت غذایی با تکیه بر تولید داخلی و ارتقای سلامت مواد غذایی» باشد. این نظام با ارائه داده‌های دقیق و به‌هنگام، امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد (Evidence-based Making Decision) را در سیاست‌گذاری کشاورزی فراهم می‌کند.

از منظر توسعه پایدار، این چارچوب در راستای سیاست‌های کلی کشاورزی، به حفاظت از منابع طبیعی، کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و ارتقای بهره‌وری انرژی کمک می‌کند. تلفیق فناوری با داده‌های بومی، موجب می‌شود که کشاورزی ایران نه تنها به سمت خودکفایی در محصولات اساسی حرکت کند، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز در مسیر پایداری قرار گیرد.

در آینده، استفاده از تصاویر راداری (SAR) پیاده‌سازی مدل بر سخت‌افزارهای ارزان‌تر، و آزمون آن در مقیاس کشوری، می‌تواند گام‌های بعدی در مسیر توسعه این چارچوب به‌شمار آید. پژوهش حاضر گواهی بر آن است که تلفیق علم داده، بینایی رایانه‌ای و تخصص کشاورزی می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در شکل‌دهی نسل آینده آمارگیری و تصمیم‌سازی هوشمند در بخش کشاورزی ایفا کند.

ملاحظات اخلاقی و تعهدات

ملاحظات اخلاقی: این مقاله با رعایت اصول اخلاقی در پژوهش انجام شده است.

حامی مالی: این مقاله حامی مالی ندارد.

مشارکت نویسندگان: تمام نویسندگان در آماده‌سازی این مقاله مشارکت کرده‌اند.

تعارض منافع: بنابه اظهار نویسندگان، در این مقاله هیچگونه تعارض منافی وجود ندارد.

تعهد کپی‌رایت: طبق تعهد نویسندگان، حق کپی‌رایت (CC) رعایت شده است.

سپاس‌گذاری:

منابع

- [۱] Abdali, E., Valadan Zoej, M. J., Taheri Dehkordi, A., & Ghaderpour, E. (2023). A parallel-cascaded ensemble of machine learning models for crop type classification in Google earth engine using multi-temporal sentinel-1/2 and landsat-8/9 remote sensing data. *Remote Sensing*, 16(1), 127.
- [۲] Allu, A. R., & Mesapam, S. (2025). Fusion of satellite and UAV imagery for crop monitoring. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 71–79.
- [۳] Bagherpour, H., & Mohamadi, H. (2014). Challenges and prospects of precision agriculture in Iran. *International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends*, 17(1), 1–8.
- [۴] Boumahdi, M., et al. (2025). A new benchmark for spatiotemporal fusion of Sentinel-2 and Sentinel-3 OLCI images. *Earth Science Informatics*.
- [۵] Chen, Q., Li, X., Yang, C., & Zhang, J. (2022). A deep learning approach for crop classification using UAV and satellite data fusion. *Sensors*, 22(15), 5890. <https://doi.org/10.3390/s22155890>
- [۶] Copernicus. (2022). *Monitoring agricultural areas using Sentinel data for the CAP*. European Union. <https://www.copernicus.eu/en>

- [۷] da Silva, A. A., Ferreira, M. A., & de Souza, R. C. (2021). Large-scale rural property mapping using deep learning and satellite imagery in Brazil. *Remote Sensing*, 13(6), 1187. <https://doi.org/10.3390/rs13061187>
- [۸] Dosovitskiy, A. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
- [۹] Gómez-Chova, L., Tuominen, S., & Melgani, F. (2020). Satellite and UAV fusion for precision agriculture: A review. *Agriculture*, 10(11), 553. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110553>
- [۱۰] Guo, X., Feng, Q., & Guo, F. (2025). CMTNet: a hybrid CNN-transformer network for UAV-based hyperspectral crop classification in precision agriculture. *Scientific Reports*, 15(1), 12383.
- [۱۱] Johnson, D. M., Mueller, R., & Kwarteng, A. (2020). The Cropland Data Layer: Integrating remote sensing and machine learning for US crop monitoring. *Agricultural Systems*, 178, 102760. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102760>
- [۱۲] Khaki, S., Wang, L., & Archontoulis, S. V. (2020). A CNN–RNN framework for crop yield prediction. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1759. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01759>
- [۱۳] Li, W., & Roy, D. P. (2020). A review of Sentinel-2 data applications for agricultural monitoring. *Remote Sensing*, 12(18), 3020. <https://doi.org/10.3390/rs12183020>
- [۱۴] Rad, A. M., Ashourloo, D., Shahrabi, H. S., & Nematollahi, H. (2019). Developing an automatic phenology-based algorithm for rice detection using sentinel-2 time-series data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(5), 1471–1481.
- [۱۵] Mouazen, A. M., Rombouts, J., & Ramon, H. (2021). Use of UAV and satellite fusion data for crop yield prediction: A machine learning approach. *Sensors*, 21(5), 1743. <https://doi.org/10.3390/s21051743>
- [۱۶] Ruiz, L. A., Pérez, M., & Sanchez, J. M. (2020). Integration of UAV and satellite imagery for crop monitoring using machine learning. *Agronomy*, 10(7), 1004. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071004>
- [۱۷] Saini, R., & Rao, M. N. (2023). Rice crop classification using Vision Transformers and Sentinel-2 data in India. *Remote Sensing Letters*, 14(2), 112–122. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2161678>
- [۱۸] Shi, Y., & Wu, C. (2021). Real-time crop classification using edge computing: A case study on UAV data. *Sensors*, 21(3), 1039. <https://doi.org/10.3390/s21031039>
- [۱۹] Singh, A., Chatterjee, A., & Gupta, R. (2021). Deep learning-based crop classification in India using Sentinel-2 and LSTM. *Computers and Electronics in Agriculture*, 186, 106205. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106205>
- [۲۰] Wang, Y., Zhang, L., & Zhang, Y. (2021). Multisensor data fusion based on Transformer for crop monitoring. *Remote Sensing*, 13(11), 2165. <https://doi.org/10.3390/rs13112165>
- [۲۱] Xiang, J., Liu, J., Chen, D., Xiong, Q., & Deng, C. (2023). CTFuseNet: A multi-scale CNN-transformer feature fused network for crop type segmentation on UAV remote sensing imagery. *Remote Sensing*, 15(4), 1151. <https://doi.org/10.3390/rs15041151>

- [۲۲] Yang, G., Zhao, C., & Feng, Q. (2023). Edge AI for smart farming: A review of recent advances and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 2752–2767. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3157826>
- [۲۳] Zhang, L., Zhang, L., & Du, B. (2016). Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(2), 22–40. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2540798>
- [۲۴] Zhang, Y., He, Y., & Huang, X. (2023). Early detection of crop stress using UAV and satellite fusion with attention-based learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 198, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.03.004>
- [۲۵] Zeng, Z., Mahmood, T., Wang, Y., Rehman, A., & Mujahid, M. A. (2025). AI-driven smart agriculture using hybrid transformer-CNN for real time disease detection in sustainable farming. *Scientific Reports*, 15(1), 25408.