



Evaluation of the Impact of Management Policies on Farmers' Behavior in the Ardabil Plain Using a Hybrid Agent-Based and Machine Learning Model

Negin Salimi¹ | Mohammad Ferdosian¹ | Najmeh Mahjouri¹

1. Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: mahjouri@kntu.ac.ir

Keywords:

Agent-based model,
Behavior modeling,
Aquifer balance, Cropping
pattern, Machine learning.

Received:

08 May 2026

Revised:

19 July 2026

Accepted:

14 August 2026

Extended Abstract

Introduction

Sustainable management of groundwater resources, particularly in arid and semi-arid regions, is a critical global challenge. The Ardabil plain, one of Iran's key agricultural zones, has experienced a significant decline in groundwater levels over recent decades due to unsustainable extraction practices. This issue is exacerbated by climate variability, frequent droughts, and the complex socio-economic and behavioral dynamics of farmers as primary groundwater users. Understanding and modeling farmers' decision-making processes is essential for designing effective management policies that balance groundwater conservation with agricultural productivity and economic viability. Traditional approaches often simplify farmer behavior, overlooking dynamic learning, social interactions, and psychological drivers. To address these gaps, this study introduces a novel hybrid framework that integrates Agent-Based Modeling (ABM) with Artificial Intelligence (AI) and machine learning algorithms. The primary objective is to simulate farmers' adaptive behaviors in response to hydrological, climatic, and management stimuli, and to evaluate the consequences of eleven distinct management scenarios on aquifer sustainability and farmers' economic welfare. This framework enables the dynamic, data-driven representation of behavioral rules, offering a more realistic tool for policy assessment and groundwater governance.

How to cite this article:

Salimi, N., Ferdosian, M. & Mahjouri, N. (2026). Evaluation of the impact of management policies on farmers' behavior in the Ardabil Plain using a hybrid agent-based and Machine Learning model. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(15), 231-266. [10.22077/jdcr.2026.11290.1232](https://doi.org/10.22077/jdcr.2026.11290.1232).



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee: Journal of Drought and Climate change Research (JDCR). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

This research was conducted in the Ardabil plain, covering an area of approximately 6,503 km² in northwestern Iran, within the Qarah-Su River basin. The study employs a comprehensive dataset spanning 2000 to 2020, including hydrological data (groundwater balance, well withdrawal volumes, aquifer storage changes), climatic data (precipitation, evaporation, and seasonal forecasts from the ECMWF numerical weather prediction model), and detailed socio-economic and behavioral data collected from 340 farmers through structured questionnaires and semi-structured interviews using a snowball sampling method. The questionnaire captured demographic, economic, and psychological variables, including age, education, income, farm size, crop type, irrigation system, economic status, attitude toward water conservation, subjective norms, and perceived behavioral control. Reliability and validity of the measurement instrument were confirmed through Cronbach's alpha ($\alpha > 0.7$), composite reliability ($CR > 0.7$), and average variance extracted ($AVE > 0.5$).

The hybrid ABM-AI framework consists of four integrated modules: (1) farmer behavioral modeling, (2) agent-based simulation, (3) groundwater balance simulation, and (4) scenario evaluation and selection. In the behavioral module, a Random Forest algorithm was trained to predict farmers' willingness to switch from traditional to modern irrigation systems, while an Artificial Neural Network (ANN) with six layers (one input, four hidden, and one output) was developed to predict crop choice patterns. Both models were trained using 70% of the data and validated on the remaining 30%, with hyperparameter optimization performed via grid search and cross-validation. The ABM simulates yearly decision-making cycles, where each farmer agent evaluates net income relative to the poverty line, receives drought forecast information (based on the Standardized Precipitation Index, SPI) derived from downscaled and bias-corrected ECMWF outputs, and then selects irrigation systems and crop types according to behavioral rules. Groundwater dynamics were simulated through a water balance equation accounting for inflows and outflows. The model's performance was validated against observed data using Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Root Mean Square Error (RMSE). Eleven management scenarios were designed by combining compulsory measures (awareness campaigns, watershed management) with voluntary economic incentives (land consolidation, guaranteed prices, loans to needy farmers, and loans to all farmers). Scenario effectiveness was assessed based on groundwater withdrawal reduction, aquifer storage improvement, and economic feasibility.

Results and Discussion

The Random Forest model outperformed XGBoost and decision tree algorithms in predicting irrigation system choice, achieving an accuracy of 0.88, precision of 0.88, recall of 0.84, and F-score of 0.86. The ANN model for crop selection demonstrated strong predictive capability, with R^2 values of 0.95 and 0.94 for training and test datasets, respectively. The integrated ABM-AI model effectively simulated groundwater dynamics, with NSE values of 0.92 for aquifer storage changes and 0.86 for groundwater withdrawal volumes. The model also successfully reproduced observed trends in the adoption of modern irrigation systems, showing a progressive increase over time driven by aquifer depletion and governmental support programs.

Simulation of the eleven management scenarios revealed that scenario 8—combining guaranteed prices for low-water-demand crops with targeted loans to financially vulnerable farmers—emerged as the most effective and economically feasible option. This scenario reduced groundwater withdrawals by an average of 8.8% compared to baseline observations, while maintaining farmers' income stability. Scenarios 4, 9, and 11, which included loans to all farmers, achieved even greater water savings but incurred substantially higher implementation costs, making them less sustainable from a financial perspective. The results demonstrate that providing farmers with accurate drought forecasts significantly influences their decisions, encouraging the cultivation of low-water-demand crops such as barley, lentils, and chickpeas, while reducing the area planted to water-intensive crops like potatoes and sugar beets. For example, wheat cultivation area remained relatively stable across scenarios due to guaranteed pricing, while alfalfa cultivation—a twice-annual crop—showed notable reductions under effective management scenarios.

Conclusion

This study presents a robust hybrid ABM-AI framework for simulating and evaluating the impacts of management policies on farmers' behavior and groundwater resources in the Ardabil plain. The integration of machine learning algorithms with agent-based modeling allows for dynamic, data-driven representation of

farmer decision-making, capturing the complex interplay of economic, social, psychological, and environmental factors. The results confirm that providing timely drought forecasts and implementing well-designed economic incentives can significantly improve groundwater sustainability without compromising farmers' livelihoods. Among the eleven scenarios tested, scenario 8—combining guaranteed prices and targeted loans—provided the optimal balance between water conservation and economic feasibility, reducing groundwater withdrawals by 8.8%. Nevertheless, the study acknowledges certain limitations, including the exclusion of direct social interactions among farmers (e.g., neighborhood effects, cooperation, and competition), the assumption of independent wells per farmer, and the reliance on SPI as a drought indicator, which does not account for temperature and evapotranspiration effects. Future research should incorporate these factors, integrate institutional actors (e.g., regional water companies and agricultural organizations) as independent agents, and consider comprehensive drought indices such as SPEI or PDSI. Additionally, spatial factors such as farm location and distance to water sources should be included in decision-making rules. The proposed framework, with appropriate calibration, can serve as a valuable tool for sustainable groundwater management in other arid and semi-arid regions facing similar challenges.



ارزیابی تأثیر سیاست‌های مدیریتی بر رفتار کشاورزان دشت اردبیل با کاربرد مدل ترکیبی عامل - بنیان و یادگیری ماشین

نگین سلیمی^۱ | محمد فردوسیپان^۱ | نجمه مهجوری مجد^۱ 

۱- گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: mahjouri@kntu.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

مدل عامل بنیان،
مدل سازی رفتار، تعادل
آبخوان، الگوی کشت،
یادگیری ماشین.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۲/۱۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۴/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۵/۲۳

آبخوان اردبیل به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی، با برداشت‌های بی‌رویه و افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی روبه‌رو بوده است. این پژوهش با هدف شبیه‌سازی رفتار عامل‌های کشاورزی در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و ارزیابی پیامدهای رفتارها بر آبخوان، یک چارچوب ترکیبی مدل‌سازی عامل - بنیان و الگوریتم‌های هوش مصنوعی ارائه می‌کند. در مدل‌سازی فرایند تصمیم‌گیری عامل‌ها، از روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی بهره گرفته می‌شود. داده‌های ۳۴۰ پرسش‌نامه تکمیل شده توسط کشاورزان، اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی، داده‌های بیلان آب زیرزمینی، اطلاعات الگوی کشت و محصولات کشاورزی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به کار می‌روند. در شبیه‌سازی رفتار در زمینه انتخاب الگوی کشت، وضعیت خشکسالی در سال آبی پیش رو در نظر گرفته می‌شود. مقدار یک شاخص خشکسالی اقلیمی بر پایه داده‌های بارش مدل‌های پیش‌بینی عددی آب‌وهوا - که ریز مقیاس‌سازی و تصحیح می‌شوند - پیش‌بینی می‌شود. تعاملات میان عامل‌ها و میزان تمایل آن‌ها به حفظ منابع آب زیرزمینی تحلیل و اثر ۱۱ سناریوی مدیریتی، شامل آگاه‌سازی، آبخیزداری، یکپارچه‌سازی اراضی، قیمت‌های تضمینی و اعطای تسهیلات مالی، بر رفتار کشاورزان و شرایط هیدرولوژیکی منطقه ارزیابی می‌شود. بر پایه نتایج، آگاهی از وضعیت خشکسالی پیش رو، تأثیر قابل توجهی بر تمایل به کشت محصولات کم‌آب‌بر دارد. اجرای سناریوی ترکیب قیمت‌های تضمینی و اعطای وام به کشاورزان نیازمند، به طور میانگین برداشت از آب زیرزمینی را تا حدود ۹ درصد کاهش می‌دهد و ضمن بهبود وضعیت آبخوان، تعادل مناسبی میان اهداف حفاظتی و منافع اقتصادی کشاورزان برقرار می‌کند.

مقدمه

در سال‌های کنونی، تغییر کاربری اراضی کشاورزی و پیامدهای آن بر پایداری خدمات اکوسیستمی به یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب تبدیل شده است. در این زمینه، تمرکز بسیاری از پژوهش‌ها بر شناسایی عوامل اقتصادی، اجتماعی و سیاستی مؤثر بر تصمیم‌گیری کشاورزان و مدیریت منابع آب در زمان خشکسالی بوده است.

برای نمونه، ال فارطاسی و همکاران (El Fartassi et al., 2025) با ارائه یک چارچوب یکپارچه مبتنی بر مدل‌سازی عامل - بنیان^۱ که مؤلفه‌های رفتاری (بر پایه نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده)^۲ و زیست‌فیزیکی (شامل شوری خاک و بهره‌وری محصول) را تلفیق می‌کرد - نشان دادند که افزایش دسترسی به آب زیرزمینی از طریق مجوزهای برداشت، گرچه در کوتاه‌مدت بهره‌وری را افزایش می‌دهد، در بلندمدت، منجر به شوری گسترده خاک و قابل کشت نبودن زمین‌های کشاورزی می‌شود.

راسی و همکاران (Rossi et al., 2026) با توسعه یک مدل عامل - بنیان مبتنی بر کلیات، مفاهیم طراحی، جزئیات و تصمیمات طراحی^۳ (ODD+D) نشان دادند که سیاست‌های آموزشی در مقایسه با دادن یارانه‌ها، اثرگذاری بیشتری بر افزایش سهم بازارهای محلی دارند، هرچند یارانه‌ها می‌توانند نقش مهمی در کاهش نابرابری درآمدی ایفا کنند. تمرکز برخی پژوهش‌های تازه بر این موضوع بوده است که ساختار زمین اراضی چگونه می‌تواند بر رفتار حفاظتی کشاورزان اثر بگذارد.

در این زمینه، کنگ و همکاران (Cong et al., 2026) نشان دادند که مزارع بزرگ‌تر تمایل بیشتری به سرمایه‌گذاری

در حفاظت از زیستگاه دارند، درحالی‌که مزارع کوچک‌تر بیشتر به دنبال بیشینه‌سازی سود کوتاه‌مدت هستند. همچنین، موقعیت جغرافیایی مزارع نقش مهمی در شکل‌گیری رفتارهای مشارکتی یا فرصت‌طلبانه در تأمین این خدمات دارد. در زمینه سامانه‌های هیدرولوژیکی - اجتماعی نیز، مطالعات اخیر بر اثرات رفتار تطبیقی کشاورزان در رویارویی با خشکسالی‌های متوالی تمرکز داشته‌اند.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که گرچه رفتارهای محافظه‌کارانه و صرفه‌جویانه می‌توانند در کوتاه‌مدت آسیب‌پذیری را کاهش دهند، در بلندمدت ممکن است به تشدید فشار بر منابع آب منجر شوند.

در این زمینه، کلتف و همکاران (Kalthof et al., 2025) با استفاده از مدل GEB4 و نظریه مطلوبیت مورد انتظار ذهنی^۴ نشان دادند که تصمیمات تطبیقی کشاورزان در رویارویی با خشکسالی، اثرات ناهمگن و گاه متناقضی بر درآمد، تولید و منابع آب زیرزمینی دارد. مدل‌سازی عامل‌بنیان به‌عنوان رویکردی کارآمد برای شبیه‌سازی تعامل بین تصمیمات خرد کشاورزان و الگوهای کلان کاربری اراضی مورد توجه قرار گرفته است.

برای نمونه، شاهپری و اورسل (Shahpari & Eversole, 2024) با توسعه یک مدل عامل - بنیان و تلفیق آن با چارچوب طراحی مکان - محور^۵، نشان دادند که عواملی مانند قیمت شیر، دردسترس بودن آب آبیاری و اثر همسایگی (پیروی از همسایگان) به طور مستقیم بر پذیرش محصولات جایگزین مانند شاهدانه تأثیر می‌گذارند.

در این چارچوب، قیمت شیر به‌عنوان شاخصی از سودآوری فعالیت‌های دامداری عمل کرده به طور غیرمستقیم

⁴ Geographical, Environmental, and Behavioural Model

⁵ Subjective Expected Utility Theory

⁶ Geodesign

¹ Agent Based Model (ABM)

² Theory of Planned Behavior

³ Overview, Design Concepts, Details+Decisions

و اعمال مالیات بر برق چاه‌های کشاورزی، گرچه در کوتاه‌مدت مصرف آب را کاهش می‌دهند، اما به دلیل واکنش‌های تطبیقی کشاورزان (مانند حفر چاه‌های غیرمجاز یا تغییر الگوی کشت) اثرگذاری آن‌ها در بلندمدت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. یافته اصلی آنان این بود که سیاست‌های ترکیبی (قیمتی همراه با نظارت و آگاهی‌بخشی) نسبت به سیاست‌های تک‌بعدی، کارآمدی بیشتری در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دارد.

ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک تولید کشاورزی در رویارویی با اثرات تغییر اقلیم، نیازمند رویکردهایی است که رفتار تطبیقی کشاورزان را در مقیاس خرد و تعاملات آن‌ها را با عوامل محیطی و اقتصادی بررسی کند.

برای نمونه، رودیگورز و همکاران (Rodríguez et al., 2025) با توسعه یک مدل عامل - بنیان در تولید توت‌فرنگی، نشان دادند که تغییرات دمایی و الگوهای بارش، آسیب‌پذیری کشاورزان را به طور ناهمگن تحت تأثیر قرار می‌دهد و روش‌هایی مانند تنظیم تقویم کشت و تغییر ارقام کشت‌شده، گرچه در کوتاه‌مدت ریسک را کاهش می‌دهند، اما در بلندمدت به دلیل افزایش دفعات تنش‌های اقلیمی، کارایی خود را از دست می‌دهند. نتایج نشان داد که ترکیب بیمه محصول با سیستم‌های هشدار زودهنگام اقلیمی، مؤثرترین راهبرد برای کاهش آسیب‌پذیری بلندمدت در برابر اثرات تغییر اقلیم است.

کاربرد مدل‌سازی عامل - بنیان در تحلیل تأثیر سیاست‌های آبیاری بر رفتار کشاورزان نیز یکی دیگر از مطالعات مهم و تأثیرگذار در زمینه رفتار عامل‌ها است.

پیچیدگی‌های ذاتی سامانه‌های هیدرولوژیکی، همراه با رفتارهای گوناگون گروه‌داران^۳، ضرورت توسعه رویکردهای پیشرفته‌ای را به منظور مدل‌سازی تعاملات انسانی - محیطی

بر تمایل کشاورزان به پذیرش محصولات جایگزین مانند شاهدانه تأثیر می‌گذارد. به طور مشخص، کاهش قیمت شیر با کاهش سودآوری دامداری، انگیزه کشاورزان برای استفاده از محصولات جایگزین (مانند شاهدانه) را افزایش می‌دهد، درحالی‌که افزایش قیمت شیر این انگیزه را کاهش می‌دهد. یافته اصلی آنان این بود که سرمایه‌گذاری در آبیاری، حساسیت کشاورزان را به نوسانات قیمت به شکل غیرخطی افزایش می‌دهد.

شناخت عوامل روانی - اجتماعی مؤثر بر تمایل کشاورزان به حفاظت منابع آب یکی از چالش‌های کلیدی در مدل‌سازی رفتارها محسوب می‌شود.

برای نمونه، مسائلی و احمدی (Masaeli & Ahmadi, 2024) با تلفیق مدل‌سازی عامل - بنیان و نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده توسعه‌یافته (با افزودن هنجارهای اخلاقی^۱ و ریسک درک‌شده^۲) در دشت لنجانان ایران، نشان دادند که این پارامترهای اضافه شده، تأثیر معناداری بر تمایل و رفتار صرفه‌جویی آب در میان کشاورزان دارند. نتایج نشان داد که اجرای هم‌زمان سیاست افزایش قیمت محصولات کم‌آبر و افزایش هزینه آب و برق، می‌تواند درآمد کشاورزان را ۷۵ درصد افزایش و مصرف آب سطحی و زیرزمینی را ۲۱/۵ درصد کاهش دهد که بالاترین سطح صرفه‌جویی را در میان سناریوهای بررسی‌شده نشان می‌دهد.

مدل‌سازی چندعامله به‌عنوان رویکردی کارآمد برای ارزیابی اثرات پویای سیاست‌های اقتصادی - اجتماعی بر رفتار مصرف‌کنندگان منابع آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است.

برای نمونه، آقازاده و همکاران (Aghazadeh et al., 2024) با توسعه یک مدل عامل‌بنیان چندلایه در یکی از دشت‌های ایران، نشان دادند که سیاست‌هایی مانند افزایش قیمت آب

³ Stakeholders

¹ Moral Norms

² Perceived Risk

شناسایی شد.

بر اساس یافته‌ها، عوامل انسانی دارای بالاترین اولویت و عوامل فرهنگی، اجتماعی، اقلیمی و جغرافیایی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در میان زیرشاخص‌ها، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی بیشترین درجه اهمیت را دارا بود و زیرشاخص‌هایی نظیر رشد جمعیت، عدم آگاهی در مورد کمبود آب، کاهش بارش و افزایش سدها و چاه‌های غیرمجاز در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

دگرگونی‌های سال‌های کنونی در مدیریت منابع آب و کشاورزی، به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم و محدودیت منابع، نشان‌دهنده نقش پیچیده عوامل اجتماعی، اقتصادی و رفتاری در تصمیم‌گیری کشاورزان است. سرمایه اجتماعی و تعاملات اجتماعی از جمله مؤلفه‌هایی هستند که تأثیر قابل توجهی بر انتخاب رفتارهای سازگارانه کشاورزان دارند.

به‌عنوان نمونه، لی و همکاران (Li et al., 2023) در یک منطقه کشاورزی در چین نشان دادند که اعتماد به اطلاعات مراکز خدمات ترویج کشاورزی بیشترین اثر و مشارکت در تعاونی‌های روستایی کمترین اثر را بر رفتار سازگارانه کشاورزان دارد. در همین راستا، ویژگی‌های اقتصادی خانوار نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند؛ درآمد کشاورزی و فعالیت‌های خارج از بخش کشاورزی می‌تواند انگیزه کشاورزان برای اتخاذ راهبردهای پرهزینه و مؤثر، مانند تغییر ارقام محصول یا استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری، افزایش دهد (Mirzaei et al., 2022). علاوه بر این، مشارکت فعال در گروه‌های اجتماعی منجر به تقویت درک خطر و باورهای مربوط به اثر تغییر اقلیم می‌شود و به نوبه خود انگیزه بیشتری برای اتخاذ راهبردهای انطباقی فراهم می‌کند.

یعقوب‌زاده و همکاران (Yaghoobzadeh et al., 2026) به شبیه‌سازی دبی قنات‌های منطقه بلده فردوس با استفاده از

برجسته می‌سازد.

پژوهش‌های متعدد با بهره‌گیری از مدل‌سازی عامل - بنیان به بررسی رفتارهای کشاورزان در مدیریت منابع آب و سازگاری با تنش‌های اقلیمی پرداخته‌اند.

این مطالعات، با تمرکز بر پویایی‌های اجتماعی، رفتاری و نهادی، بینش‌هایی درباره تصمیم‌گیری‌های کشاورزی ارائه داده‌اند، ولی همچنان محدودیت‌هایی در تحلیل جامع تعاملات میان عوامل انسانی، نهادی و بیوفیزیکی وجود دارد. برای نمونه، سلیمی و همکاران (Salimi et al., 2025) با استفاده از مدل عامل - بنیان و نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده و همچنین، استفاده از شاخص‌های خشکسالی و داده‌های پیش‌بینی بارش دریافت شده از مدل‌های عددی پیش‌بینی جو (NWP) رفتار کشاورزان را در دشت اردبیل مدل کردند. نتایج نشان داد آگاهی از وضعیت خشکسالی به همراه نوع سیاست‌های سازمان‌های بالادستی می‌تواند در تصمیم‌گیری کشاورزان تأثیر بسزایی داشته باشد.

همچنین، فرزانه و همکاران (Farzaneh et al., 2023) به توسعه نظریه رفتارهای طرفدار محیط زیست با بهره‌گیری از نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده پرداختند. ایشان با تلفیق مؤلفه‌های شناختی و غیرشناختی مناسب و با در نظر گرفتن رابطه سامان‌مند بین عوامل مؤثر بر رفتار محیط‌زیستی و بافت اجتماعی - فرهنگی، نظریه جامع‌تری را ارائه داده‌اند. آزمون مدل ارائه‌شده در چندین مطالعه تجربی نشان‌دهنده افزایش ظرفیت پیش‌بینی‌کنندگی رفتارهای محیط‌زیستی است.

رضایی و روشنی (Rezaeei and Roshani, 2024) پژوهشی به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر خشکسالی در شهرستان تربت حیدریه پرداختند.

با توجه به اینکه خشکسالی حاصل تأثیرات متقابل محیط طبیعی و اجتماعی است، با بهره‌گیری از تکنیک تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی فازی و نظرات ۱۵ نفر از خبرگان و کارشناسان جهاد کشاورزی، ۱۹ عامل فرعی را در قالب ۵ عامل اصلی

مجله پژوهش‌های خشکسالی تغییر اقلیم

الگوریتم‌های یادگیری ماشین^۱ تحت شرایط خشکسالی پرداختند.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان^۲ و شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی دبی خروجی قنات‌های منطقه بود. داده‌های مورد استفاده شامل پارامترهای اقلیمی (بارش، دما، تبخیر و تعرق)، سطح آب زیرزمینی و دبی خروجی قنات‌ها در بازه زمانی ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۰ (۲۰۲۱-۱۹۹۶) بود. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با ضریب نش - ساتکلیف (NSE) برابر با ۰/۸۹ و میانگین خطای مطلق (MAE) برابر با ۰/۰۸۷ مترمکعب بر ثانیه، بهترین عملکرد را در میان مدل‌های مورد بررسی داشت و پس از آن مدل XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) با Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) برابر با ۰/۸۵ در رتبه دوم قرار گرفت.

در سطح تحلیل و مدل‌سازی رفتاری، رویکردهای عامل - بنیان به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی تعاملات پویا میان کشاورزان و سیستم‌های منابع آب مطرح شده‌اند. بهرامی و همکاران (Bahrami et al., 2022) با استفاده از چارچوب ABM-SOP3 نشان دادند که ارتباط مستقیم و سازنده میان کشاورزان و کارورهای مخزن می‌تواند تنش آبی را تا ۵۰ درصد کاهش و سود حاصل از تصمیمات سازگارانه را افزایش دهد.

در مطالعه‌ای دیگر، یوان و همکاران (Yuan et al., 2021) تأکید کردند که تفاوت‌های رفتاری کشاورزان، از جمله سطح ریسک‌پذیری و ادراک از عدم قطعیت، الگوهای انتخاب محصول و مصرف آب را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌طوری که کشاورزان ریسک‌پذیر به محصولات پرسود و پرمصرف آب گرایش دارند، درحالی که کشاورزان محتاط‌تر

الگوهای کشت کم‌مصرف و پایدار را ترجیح می‌دهند. این یافته‌ها نشان‌دهنده حساسیت زیاد رفتار کشاورزان به سیاست‌های مدیریت آب و تغییرات در پروانه‌های برداشت است.

با وجود گسترش مطالعات در زمینه مدل‌سازی عامل - بنیان و تحلیل رفتار کشاورزان در رویارویی با تصمیمات و سیاست‌های بالادستی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که همچنان چند شکاف بنیادی در این زمینه وجود دارد.

نخست آن که بسیاری از مطالعات موجود، رفتار کشاورزان را به صورتی ساده‌سازی شده و مبتنی بر فرض‌های ثابت رفتاری مدل‌سازی کرده‌اند و کمتر به یادگیری پویا و تغییرپذیری رفتار در طول زمان توجه شده است.

دوم، در بسیاری پژوهش‌ها، تعامل میان عوامل اقتصادی، اجتماعی و روان‌شناختی به‌صورت جداگانه بررسی شده و کمتر مدلی توانسته است این ابعاد را به‌صورت یکپارچه در یک چارچوب شبیه‌سازی ترکیب کند. همچنین، نقش یادگیری ماشین و داده‌محوری در استخراج قواعد رفتاری واقعی عامل‌ها به‌صورت محدود یا صرفاً به‌عنوان ابزار کمکی به کار گرفته شده است.

بر این اساس، نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه یک چارچوب ترکیبی ABM-AI4 است که در آن رفتار کشاورزان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی استخراج و به‌روزرسانی می‌شود. این چارچوب امکان مدل‌سازی هم‌زمان تعاملات اجتماعی - اقتصادی، تصمیم‌گیری رفتاری و پیامدهای هیدرولوژیکی را در یک سامانه یکپارچه فراهم می‌سازد.

علاوه بر این، در این پژوهش، اثر ترکیبی سناریوهای مدیریتی گوناگون بر رفتار کشاورزان و تراز آبخوان به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌شود تا امکان مقایسه سناریوها از منظر

³ Standard Operating Policy

⁴ Agent-Based Modeling-Artificial Intelligence

¹ Machine Learning Algorithms

² Agent-Based Modeling (ABM)-Support Vector Machine (SVM)

رفتاری و محیط‌زیستی فراهم شود.

به طور خلاصه، می‌توان نتیجه گرفت، پژوهش Salimi et al. (2025) بر مدل‌سازی رفتار کشاورزان با استفاده از نظریه رفتار برنامه‌ریزی‌شده، شاخص‌های خشکسالی و پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های عددی پیش‌بینی جو با هدف بررسی تأثیر شرایط خشکسالی و سیاست‌های مدیریتی بر تصمیم‌گیری کشاورزان تمرکز دارد. در مقابل، پژوهش حاضر با توسعه یک چارچوب تلفیقی ABM-AI، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج و پیش‌بینی رفتار کشاورزان و انتقال این پیش‌بینی‌ها به مدل

عامل‌بنیان استفاده می‌کند.

این رویکرد امکان به‌روزرسانی داده‌محور تصمیمات عامل‌ها و ارزیابی هم‌زمان اثر سناریوهای مدیریتی را بر انتخاب الگوی کشت، سامانه آبیاری، برداشت آب زیرزمینی و وضعیت آبخوان فراهم می‌سازد. از این‌رو، تمرکز پژوهش حاضر بر توسعه یک چارچوب هوشمند برای شبیه‌سازی رفتار بهره‌برداران و ارزیابی یکپارچه پیامدهای مدیریتی و هیدرولوژیکی است. جدول ۱، مقایسه اجمالی پژوهش‌های مرتبط با پژوهش کنونی ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه پژوهش‌های انجام شده مرتبط با پژوهش کنونی
Table A1. Comparison of Previous Studies Related to the Present Study

ارزیابی آبخوان Aquifer Assessment	سناریوهای مدیریتی Management Scenarios	مدل‌سازی رفتار کشاورزان Farmer Behavior Modeling	تلفیق با یادگیری ماشین Integration with Machine Learning	مدل عامل‌بنیان ABM	پژوهش Study
✓	✓	✓	×	✓	Yuan et al. (2021)
✓	✓	✓	×	✓	Bahrami et al. (2022)
×	×	✓	×	×	Li et al. (2023)
✓	✓	✓	×	✓	Aghazadeh et al. (2024)
✓	✓	✓	×	✓	Masaeli & Ahmadi (2024)
×	✓	✓	×	✓	Shahpari & Eversole (2024)
✓	✓	✓	×	✓	El Fartassi et al. (2025)
✓	✓	✓	×	✓	Kalthof et al. (2025)
×	✓	✓	×	✓	Rodríguez et al. (2025)
✓	✓	✓	×	✓	Salimi et al. (2025)
×	×	✓	×	✓	Cong et al. (2026)
×	✓	✓	×	✓	Rossi et al. (2026)
✓	✓	✓	✓	✓	پژوهش حاضر

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

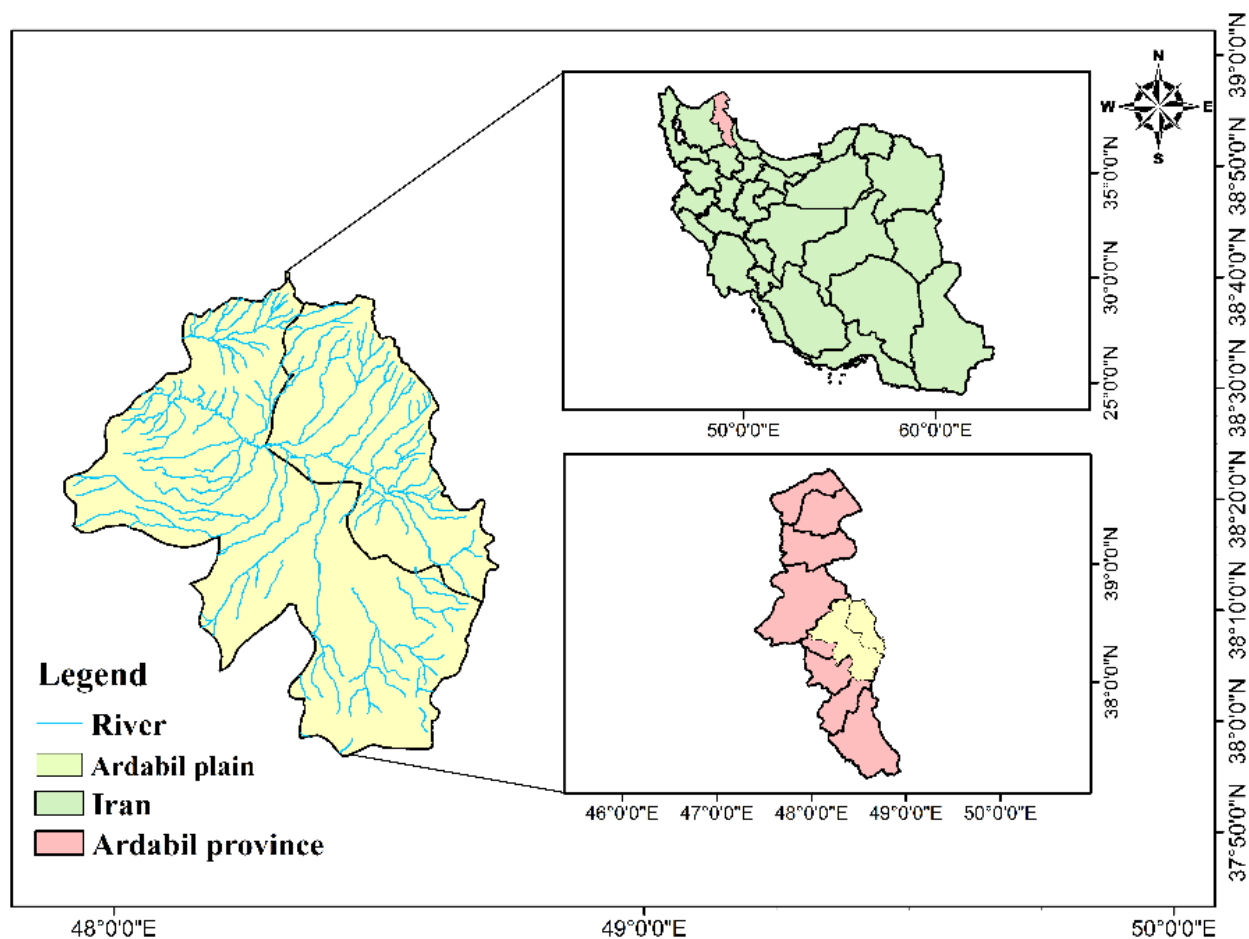
با توجه به موقعیت جغرافیایی کشور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک جهان، حفظ منابع آب زیرزمینی بنا به ضرورت‌هایی مانند نقش منابع آب زیرزمینی در تعدیل سیلاب‌ها و تنظیم جریان پایه اجتناب‌ناپذیر است.

محدوده مطالعاتی این مقاله دشت اردبیل به مساحت ۶۵۰۳ کیلومترمربع است. از این مقدار، ۱۵۹۱ کیلومترمربع شامل دشت‌های اردبیل (۹۰۰ کیلومترمربع)، رضی (۵۶۳

کیلومترمربع) و سرعین (۱۲۸ کیلومترمربع) و مابقی شامل دشت‌های کوچک، کوه‌ها و تپه‌ماهورهای اطراف دشت است (شکل ۱).

این منطقه در حوضه‌ی آبریز رودخانه قره‌سو است. این رودخانه پس از پیوستن همه آب‌های جاری منطقه به آن، در شمال غربی از این منطقه خارج می‌شود.

محدوده مطالعاتی بین ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (Ardabil Regional Water Company, 2015).



شکل ۱. منطقه مطالعاتی دشت اردبیل
Fig 1. Study area of the Ardabil plain

در دستیابی به اهداف مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی دارد.

• کشاورزان

هدف عامل کشاورز افزایش درآمد و رسیدن به یک سود اقتصادی است؛ بنابراین، تصمیماتی که در طول دوره‌ی زراعت خود می‌گیرد، بر پایه افزایش سود خود است.

کشاورزان بسته به سن، تحصیلات یا بزرگی زمین و مرغوبیت خاک‌های کشاورزی می‌توانند تأثیر متفاوتی بر برداشت و حفاظت منابع آب داشته باشند. با توجه به مشاهدات میدانی و مصاحبه با کشاورزان در دشت اردبیل به دلیل وضعیت نامناسب اقتصادی برخی از آن‌ها، کشاورزانی که از نظر مالی با مشکل روبه‌رو هستند تلاش می‌کنند وضعیت نامناسب اجتماعی - اقتصادی خود را بهبود ببخشند. بنابراین، در این مقاله ابتدا هر عامل کشاورز درآمد خالص خود را در پایان هر سال کشاورزی با در نظر گرفتن تمام هزینه‌های کشاورزی از سال قبل و همچنین، سود حاصل از فروش در نظر می‌گیرد.

عامل کشاورز سود به دست آمده سال گذشته‌اش را با خط فقر سالانه مقایسه می‌کند. سپس، برای انتخاب نوع سامانه آبیاری وارد مرحله‌ی بعدی می‌شود. در این مرحله، در مدل ABM-AI کشاورزان نوع سامانه آبیاری خود را در یک چارچوب فازی که پایه آن الگوریتم درخت تصمیم به‌منظور پیش‌بینی میزان تمایل کشاورزان در حفظ منابع آب است، انتخاب می‌کنند. سپس، اگر درآمد کشاورز به زیر خط فقر برسد او کشت خود را، از بین الگوهای کشت با بیشترین سود، برای سال کشاورزی بعدی انتخاب می‌کند. همچنین، در صورتی که کشاورز وضعیت مالی قابل‌قبولی نسبت به خط فقر داشته باشد، فرایند تصمیم‌گیری عامل کشاورز به مرحله دوم می‌رود. در غیر این صورت، فرایند تصمیم‌گیری به پایان رسیده است.

گروداران اصلی

• شرکت آب منطقه‌ای اردبیل

شرکت آب منطقه‌ای به‌عنوان سازمان متولی تأمین، انتقال و تخصیص منابع آب، نقش کلیدی در مدیریت جامع منابع آب در سطح منطقه‌ای ایفا می‌کند. علاوه بر مسئولیت تأمین آب برای مصارف گوناگون شامل شرب، کشاورزی، صنعت و خدمات، این شرکت وظیفه نظارت بر بهره‌برداری صحیح و پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی را نیز بر عهده دارد.

مدیریت منابع آب در این شرکت‌ها شامل برنامه‌ریزی دقیق برای تعادل بخشی به ذخایر آب‌های زیرزمینی و کنترل برداشت‌ها به‌منظور جلوگیری از کاهش بی‌رویه منابع است. به‌علاوه، این شرکت با همکاری سازمان‌های مرتبط، سیاست‌ها و راهکارهای مقابله با خشکسالی و مدیریت کم‌آبی را تدوین و اجرا می‌کنند تا پایداری منابع آب در شرایط نوسانات اقلیمی تضمین شود. در نهایت، شرکت آب منطقه‌ای اردبیل با بهره‌گیری از سامانه‌های اطلاعاتی و بانک‌های داده منابع و مصارف آب، نظارت مستمر بر وضعیت منابع آب را انجام و گزارش‌هایی تحلیلی را به‌منظور بهبود عملکرد و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ارائه می‌دهد.

• جهاد کشاورزی اردبیل

سازمان جهاد کشاورزی به‌عنوان یکی از سازمان‌های کلیدی در بخش کشاورزی، نقش مهمی در برنامه‌ریزی و تعیین الگوی کشت ایفا می‌کند. این سازمان با انجام اقدامات ترویجی و اصلاحی، هدف خود را افزایش بهره‌وری و کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی قرار داده است. علاوه بر این، ارتباط مستمر و نزدیک با کشاورزان، امکان انتقال دانش فنی، ترویج روش‌های نوین کشاورزی و ارتقای سطح آگاهی بهره‌برداران را فراهم می‌آورد. به همین دلیل، سازمان جهاد کشاورزی به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در بهینه‌سازی مصرف منابع آب و توسعه پایدار کشاورزی شناخته می‌شود و نقش مهمی

در گام بعد، با توجه به شرایط منطقه و نظرات کارشناسان، سناریوهای مدیریتی تدوین می‌شود. هدف از تدوین این سناریوها بررسی اثر سیاست‌های گوناگون بر رفتار کشاورزان و واکنش آبخوان و در نهایت انتخاب مؤثرترین سناریو برای بهبود وضعیت آبخوان است. در نتیجه، با اجرای سناریوهای گوناگون مدیریتی، اثر آن‌ها بر رفتار کشاورزان و وضعیت آبخوان ارزیابی می‌شود و سناریو برتر انتخاب می‌شود. در شکل ۲ مراحل کلی مدل شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

در گام نخست، لازم است عامل‌های (منظور همان "agents" است) مهم شناسایی، ویژگی‌های آن‌ها بررسی، و تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آن‌ها بر یکدیگر و بر منابع آب زیرزمینی بررسی شود. به‌ویژه، میزان و نوع مصارف و نیازهای آبی، تعداد مصرف‌کنندگان و رفتار آن‌ها مانند شیوه استفاده از چاه‌های بهره‌برداری، نوع سامانه آبیاری، تخلف در برداشت و همچنین، اطلاعات آماری مانند میانگین سنی، میزان تحصیلات، مساحت سطوح زیر کشت، نوع محصولات زیر کشت و غیره مهم هستند. به این منظور، آمار و گزارش‌های پروژه‌های پیشین، بازدیدهای میدانی و طراحی پرسش‌نامه‌ها و مصاحبه با کارشناسان سازمان‌ها، وزارتخانه‌ها یا شرکت‌ها مانند آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، تعاون روستایی و عامل‌های کشاورزی (کشاورزان) به کار گرفته می‌شوند. همچنین، اطلاعات مربوط به بیان آب سطحی و زیرزمینی که شامل بارش، تبخیر، میزان نفوذ، آب‌های انتقال‌یافته به محدوده مطالعاتی و جریان‌های سطحی ورودی و خروجی، وضعیت چاه‌های مشاهداتی و داده‌های مربوط به تغذیه آبخوان گردآوری و پردازش می‌شود. به‌منظور استخراج داده‌های رفتاری کشاورزان، پرسش‌نامه‌هایی طراحی شدند که از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته به روش گلوله‌برفی و بازدیدهای میدانی تکمیل شدند.

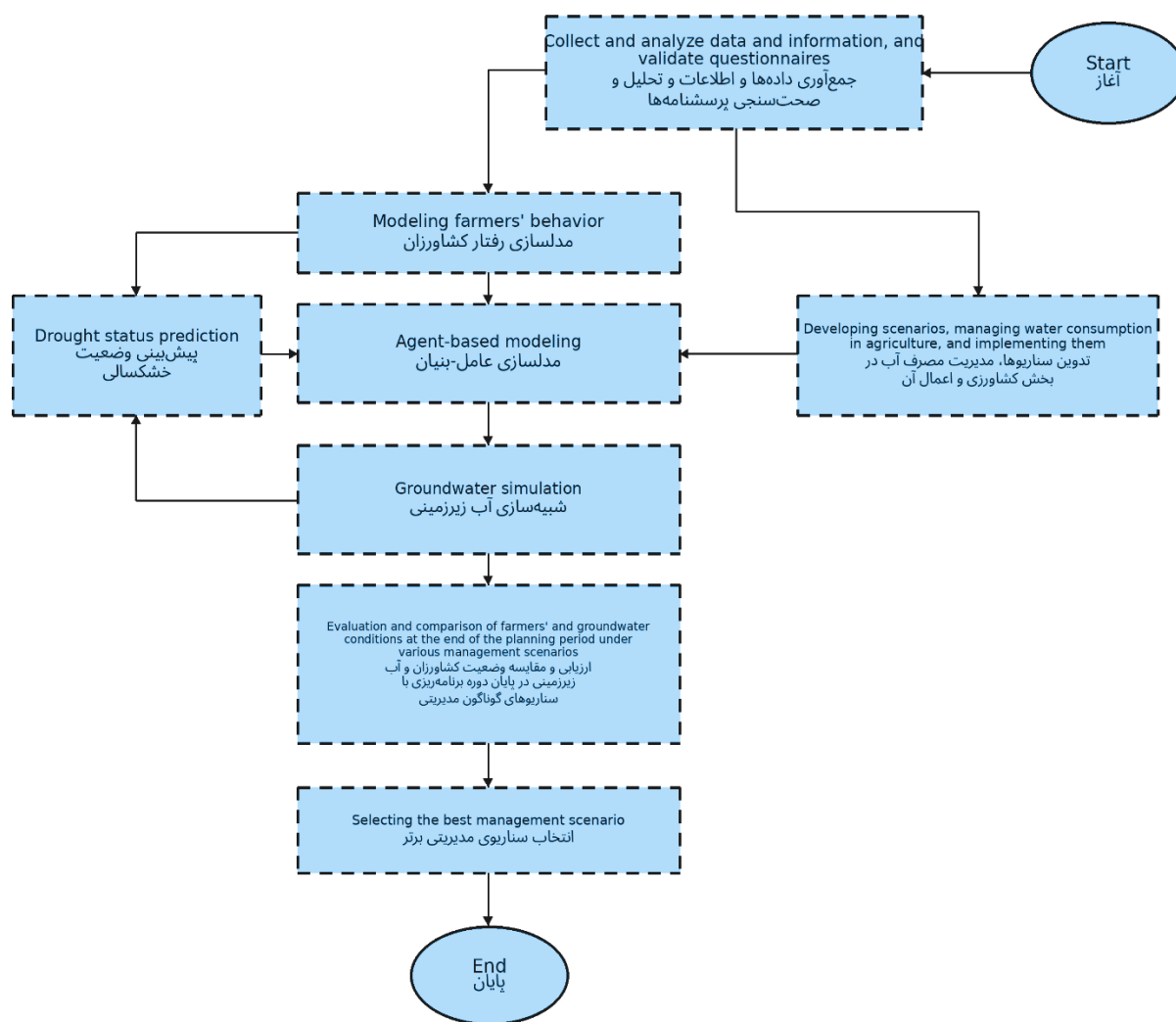
پس از پیش‌بینی میزان تمایل کشاورزان به رفتارهای گوناگون، رفتار آن‌ها به سه گروه تقسیم می‌شود. اولین رفتار بدین صورت است که کشاورزان تمایل زیادی برای انجام رفتارهای محافظه‌کارانه (صرفه‌جویانه در مصرف آب) دارند. در این صورت، محصولات کم‌آب‌بری را برای صرفه‌جویی در منابع آب انتخاب می‌کنند که این رفتار تأثیر مثبتی بر احیای آب زیرزمینی در بلندمدت یا کوتاه‌مدت می‌تواند داشته باشد. دسته دوم کشاورزانی هستند که تمایل متوسطی برای حفاظت از منابع آب دارند و محصولاتی با سود اقتصادی و نیاز آبی متوسط را انتخاب می‌کنند. از طرفی، در صورتی که کشاورز تمایل کمی به انجام رفتارهایی در راستای حفاظت از آب داشته باشد، تنها به بیشینه‌کردن سود اقتصادی خود فکر می‌کند. در این حالت، محصولات با سود اقتصادی بیشتر و معمولاً با مصرف آب زیاد انتخاب می‌کند.

گام‌های چارچوب پیشنهادی

در این مقاله، به‌منظور مدیریت تخصیص آب به آب‌بران بخش کشاورزی و رسیدن آبخوان به وضعیت نسبتاً پایدار، مدل ABM-AI توسعه داده می‌شود.

این مدل، شامل چهار بخش اصلی، مدل‌سازی رفتار کشاورزان، مدل‌سازی عامل‌بنیان، شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی و انتخاب سناریوهای برتر مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی در راستای بهبود وضعیت آبخوان است.

در این رویکرد، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، بر پایه نتایج صحت‌سنجی شده پرسش‌نامه‌ها و مصاحبه با کشاورزان ساخته می‌شود تا رفتار کشاورزان را در انتخاب نوع محصول کشاورزی پیش‌بینی کند. سپس، در مدل عامل‌بنیان، با در نظر گرفتن وضعیت اقتصادی کشاورز و تحلیل‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی رفتار کشاورزان پیش‌بینی می‌شود. در این رویکرد، از نظریه منطق فازی - که شامل مدل پیش‌بینی رفتار با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی است - نوع سامانه آبیاری کشاورزان مشخص می‌شود.



شکل ۲. گام‌های رویکرد پیشنهادی

Fig 2. The main steps of the proposed framework

میزان کنترل بر رفتار^۲ بودند. علاوه بر این، داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی شامل بارش، تبخیر، بیلان آب زیرزمینی، وضعیت چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه آبخوان و پیش‌بینی‌های اقلیمی از منابع سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای اردبیل در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ جمع‌آوری شدند. اطلاعات حاصل از پرسش‌نامه‌ها به‌عنوان داده‌های

جامعه آماری پژوهش، کشاورزان بهره‌بردار دشت اردبیل بودند، که ۳۴۰ پرسش‌نامه از آنان جمع‌آوری شد. پرسش‌نامه‌ها شامل اطلاعات فردی، اقتصادی و مدیریتی کشاورزان از جمله سن، سطح تحصیلات، درآمد، مساحت اراضی، نوع محصول، نوع سامانه آبیاری، دسترسی به منابع آب، وضعیت اقتصادی، میزان بهره‌مندی از تسهیلات، نگرش نسبت به حفاظت از منابع آب، هنجارهای ذهنی^۱ و تصور از

² Perceived Behavioral Control (PBC)

¹ Subjective Norm (SN)

آموزشی مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی به‌عنوان ورودی مدل عامل - بنیان مورد استفاده قرار گرفتند.

ساخت و اجرای مدل عامل - بنیان

مدل‌سازی عامل - بنیان یکی از رویکردهای نوین و قدرتمند در شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های پیچیده است که بر پایه تعاملات میان عامل‌های مستقل و خودمختار بنا شده است. این رویکرد با فراهم‌آوردن امکان شبیه‌سازی سناریوهای گوناگون مدیریتی، به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا به درک عمیق‌تری از پویایی‌های تصمیم‌گیری در سطوح فردی و جمعی دست یابند و نتایج حاصل را برای سیاست‌گذاری‌های دقیق‌تر به کار گیرند.

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب مدل‌های عامل‌بنیان با چارچوب‌های هیدرولوژیکی - اجتماعی، امکان شبیه‌سازی رفتار بهره‌برداران آب و ارزیابی سیاست‌های مدیریتی را در زمینه‌هایی مانند کشاورزی و منابع آب زیرزمینی فراهم می‌کند و به بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کمک می‌نماید (Sousa et al., 2024, Akhbari & Grigg, 2019).

در این بخش شاخص‌های اجتماعی و فاکتورهای روان‌شناسی‌ای که بر میزان انگیزه و رفتار کشاورزان در منطقه تأثیرگذار هستند بررسی می‌شود.

از جمله عوامل مؤثر در تصمیم‌گیری عامل‌ها نگرش^۱ است. نگرش از باورهای افراد نسبت به یک موضوع، ایجاد می‌شود و به‌طور کلی، تمایلات و رفتار عامل‌های گوناگون را در مدل عامل‌بنیان نشان می‌دهد.

پیشگیری شناسایی و پیش‌بینی این تمایلات، زمانی افزایش می‌یابد که عامل انسان باشد، زیرا، انسان تحت شرایط گوناگون و گاه به‌طور ناگهانی می‌تواند رفتارهای خود را تغییر

دهد. به‌منظور بررسی تأثیر جامعه بر کشاورزان، تأثیراتی که کشاورز از دوست، آشنا و خانواده در ارتباط با حفاظت از منابع آب می‌گیرد یا تأثیراتی که بر آنها می‌گذارد، در قالب هنجارهای ذهنی عامل‌ها بررسی می‌شود (Geo et al., 2017). در این پژوهش، مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان زیرمدل رفتاری در کنار مدل عامل‌بنیان به کار گرفته می‌شوند. به این منظور، مدل جنگل تصادفی برای پیش‌بینی رفتار کشاورزان در انتخاب یا تغییر سامانه آبیاری و مدل شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی الگوی کشت آموزش داده می‌شود. پس از آموزش، خروجی این مدل‌ها در هر گام زمانی به‌عنوان ورودی مدل عامل‌بنیان مورد استفاده و مبنای تصمیم‌گیری عامل کشاورز در انتخاب سامانه آبیاری و الگوی کشت قرار می‌گیرد. به این ترتیب، رفتار عامل‌ها بر پایه پیش‌بینی‌های به دست آمده از مدل‌های یادگیری ماشین شبیه‌سازی می‌شود و نتایج تصمیم‌های آنها در ارزیابی سناریوهای مدیریتی و تغییرات منابع آب زیرزمینی به کار گرفته می‌شود.

مدل‌های یادگیری ماشین به‌عنوان زیرمدل رفتاری در بدنه مدل عامل‌بنیان به کار می‌روند. ورودی این مدل‌ها شامل مجموعه‌ای از ویژگی‌های فردی، اقتصادی و مدیریتی کشاورزان است که از پرسش‌نامه‌های کشاورزان استخراج شده است. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

سن، سطح تحصیلات، درآمد، مساحت اراضی، نوع محصول کشت‌شده، نوع سامانه آبیاری، وضعیت اقتصادی، نگرش نسبت به حفاظت از منابع آب، هنجارهای ذهنی و تصور از میزان کنترل بر رفتار.

مدل جنگل تصادفی با استفاده از این داده‌ها آموزش می‌بیند و ضرایب اهمیت هر یک از این ویژگی‌ها را در تصمیم‌گیری کشاورزان برای تغییر سامانه آبیاری استخراج می‌کند. همچنین، شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از همین

¹ Attitude (AT)

سطوح گوناگون سیاست‌گذاری، اجرا و بهره‌برداری می‌شوند. برای شناسایی دقیق و جامع این عامل‌ها، ابتدا مصاحبه‌هایی با افراد مرتبط و مطلع انجام می‌شود. فرایند نمونه‌گیری و شناسایی عامل‌ها به روش گلوله‌برفی^۲ و با رعایت ارتباط منطقی با اهداف پژوهش صورت می‌گیرد.

در مرحله میدانی پژوهش، پرسش‌نامه‌های طراحی شده و تأیید شده توسط کارشناسان با مراجعه مستقیم به روستاهای دشت اردبیل و در میان کشاورزان توزیع و تکمیل می‌شوند. به‌منظور سنجش پایایی پرسش‌نامه، از آزمون آلفای کرونباخ استفاده می‌شود.

مقادیر گوناگون این ضریب نشان‌دهنده سطح هماهنگی درونی گویه‌هاست. مقدار آلفای کرونباخ برابر یا بزرگ‌تر از ۰/۷ به‌عنوان حداقل مقدار قابل قبول برای پایایی درونی پرسش‌نامه در نظر گرفته می‌شود.

به‌منظور بررسی روایی و پایایی ابزار اندازه‌گیری، علاوه بر محاسبه ضریب آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی^۳ و روایی همگرا از طریق میانگین واریانس استخراج‌شده^۴ محاسبه شد. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقدار پایایی ترکیبی تمامی سازه‌ها بیش از ۰/۷ و مقدار AVE نیز برای تمامی سازه‌ها بیش از ۰/۵ است که بیانگر تأیید پایایی و روایی همگرای پرسش‌نامه است (Cronbach, 1951).

تمامی مدل‌های یادگیری ماشین و مدل عامل‌بنیان در محیط Python توسعه می‌یابند. برای پیاده‌سازی مدل‌ها از کتابخانه‌های NumPy، Pandas و Scikit-Learn استفاده می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، خروجی‌های مدل عامل‌بنیان با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه و از شاخص‌های NSE و Root Mean Square Error (RMSE) برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود.

داده‌ها، الگوی کشت را پیش‌بینی می‌کند.

خروجی این دو مدل در هر گام زمانی به‌عنوان ورودی مدل عامل‌بنیان مورد استفاده و مبنای تصمیم‌گیری عامل کشاورز در انتخاب سامانه آبیاری و الگوی کشت قرار می‌گیرد. به این ترتیب، قوانین تصمیم‌گیری عامل‌ها به‌جای تعریف ثابت، بر پایه پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین به‌صورت پویا تعیین می‌شود.

تصور از میزان کنترل بر رفتار به میزان دشواری یا آسان بودن حفاظت منابع آب توسط کشاورز می‌پردازد (Ajzen, 2005; Liao et al., 2007; Russell & Fielding, 2010; Yazdanpanah et al., 2014).

تصور از میزان کنترل بر رفتار به طور مستقیم با وضعیت مالی فرد ارتباط دارد، زیرا وضعیت مالی عاملی تعیین‌کننده در تأمین امکانات مورد نیاز به‌منظور شرکت در فعالیت‌های حفظ منابع آب است. انگیزه‌ی رفتاری^۱، به‌عنوان عامل اصلی در نظریه‌ی رفتار برنامه‌ریزی‌شده، قصد فرد برای انجام یک رفتار معین است.

فرض بر این است که مقاصد، عوامل انگیزشی مؤثر بر رفتار را در برمی‌گیرند و نشان می‌دهند که عامل‌ها چقدر مایلند تلاش کنند، و برای اهداف خود برنامه‌ریزی کنند. به‌عنوان یک قاعده‌ی کلی، هر چه قصد درگیر شدن در یک رفتار قوی‌تر باشد، احتمال عملکرد آن بیشتر خواهد بود (Ajzen, 1985). با استفاده از اطلاعات تجربی، پرسش‌نامه‌ها، آمار ثبت شده که نماینده افکار، ادراک، تجارب و ترجیحات انسان است، می‌توان چگونگی تصمیم‌گیری عامل‌ها را مدل‌سازی کرد. عامل‌ها به‌عنوان موجودیت‌های تصمیم‌گیرنده هستند که می‌توانند شامل طیف وسیعی از سازمان‌ها، گروه‌های گروه‌دار و حتی افراد کلیدی باشند. این عامل‌ها عموماً شامل متولیان و گروه‌داران اصلی مدیریت منابع آب در

³ Composite Reliability (CR)

⁴ Average Variance Extracted (AVE)

¹ Intention (I)

² Snowball Method

جدول ۲. نتایج پایایی سازه‌ها در مدل رفتاری کشاورزان

Table A2. Reliability Results of the Constructs in the Farmers' Behavioral Model

سازه Factor	آلفای کرونباخ Cronbach's Alpha	پایایی ترکیبی (CR)	میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE)
نگرش (AT)	0.7	0.76	0.7
هنجار ذهنی (SN)	0.76	0.73	0.6
تصور از میزان کنترل بر رفتار (PBC)	0.76	0.76	0.55
قصد رفتاری (Intention)	0.73	0.71	0.62

پیش‌بینی بارش بر پایه مدل‌های اقلیمی

میزان دسترسی به منابع آب به طور مستقیم با تولید و نوع محصولات کشاورزی ارتباط دارد. بنابراین، اهمیت زیادی برای کشاورزان دارد که منابع آب در دسترس آن‌ها چقدر باشد (Schmidt et al., 2011).

در این گام، اطلاعات مربوط به وضعیت خشکسالی در سال پیش‌رو بر پایه پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی و شاخص خشکسالی در اختیار کشاورزان قرار داده می‌شود.

کشاورزان بر پایه این اطلاعات، همراه با در نظر گرفتن وضعیت منابع آب منطقه، نوع محصول خود را انتخاب می‌کنند. با توجه به اینکه رفتارهای کشاورزان در نوع رفتار آن‌ها در برداشت آب اهمیت بسیاری دارد و وضعیت خشکسالی می‌تواند در تصمیم‌گیری آن‌ها تأثیرگذار باشد، بررسی میزان کمبود آب و مقدار بارش در منطقه برای جبران خشکسالی نیز اهمیت زیادی دارد. با توجه به کمبود داده‌ها در بیشتر مناطق ایران، استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا (NWP) در کنار مدل‌های داده‌محور می‌تواند میزان دقت مدل را افزایش دهد. با توجه به کمبود داده‌ها در بیشتر مناطق ایران، استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا و به طور خاص استفاده از پایگاه ECMWF^۱ در کنار مدل‌های داده‌محور می‌تواند میزان دقت مدل را افزایش دهد. این مدل‌ها، پیش‌بینی‌های عددی از متغیرهای آب‌وهوایی مانند

بارش، دما و تبخیر و تعرق را ارائه می‌دهند. در این پژوهش، داده‌های مورد نیاز از پایگاه ECMWF استخراج می‌شود. ECMWF خدمات تغییرات آب‌وهوایی کوپرنیک را به نمایندگی از اتحادیه اروپا اداره می‌کند. این مرکز، از سال ۱۶۶۴ میلادی در مقیاس فصلی به بهره‌برداری رسیده است. اطلاعات مرتبط با پیش‌بینی فصلی مرکز ECMWF هر ۵ سال یکبار به‌روزرسانی می‌شود (Frnda et al., 2022). با توجه به نتایج و دقت مناسب ECMWF در پیش‌بینی بارش در پژوهش‌های گذشته، در این مقاله، از این مدل استفاده می‌شود. پس از دریافت داده‌های پیش‌بینی عددی آب‌وهوا، تصحیح داده‌ها صورت گرفته، ریز مقیاس‌سازی آنها انجام می‌شود.

در این مقاله، عامل کشاورز در فرایند تصمیم‌گیری، با توجه به پیش‌بینی بارش برای بازه‌ی زمانی آبیاری محصولات خود، نوع محصول کشاورزی را انتخاب می‌کند. از آنجا که وضعیت بارندگی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب محصولات کشاورزی دارد، در این پژوهش بارش دوره‌های آبی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی^۲ شبیه‌سازی می‌شود. سپس این اطلاعات در اختیار کشاورزان قرار می‌گیرد تا بتوانند با آگاهی از وضعیت احتمالی کم‌آبی، درباره انتخاب نوع محصول تصمیم‌گیری کنند. بدین صورت، کشاورزان از وضعیت بارش در ابتدای تصمیم‌گیری در سال جاری آگاه بوده، با توجه به آن می‌توانند نوع محصول خود را انتخاب کنند. خروجی‌های

² Numerical Weather Predictions (NWP)

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

را در زمینه کاهش مصرف آب به‌منظور سازگاری با کم‌آبی و بهبود شرایط آبخوان شبیه‌سازی می‌کند. به‌منظور استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی در مقیاس دشت اردبیل، داده‌های بارش ابتدا به روش ریز مقیاس‌سازی آماری پردازش می‌شوند. در این روش، رابطه آماری بین داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌های هواشناسی و خروجی مدل اقلیمی در دوره پایه برقرار و سپس، این رابطه برای تولید داده‌های اقلیمی در مقیاس محلی در دوره آینده به کار گرفته می‌شود. پس از ریز مقیاس‌سازی، به‌منظور کاهش خطاهای سامان‌مند مدل اقلیمی، از روش نگاشت صدک برای تصحیح اریبی داده‌های بارش استفاده می‌شود. در این روش، تابع توزیع تجمعی داده‌های شبیه‌سازی‌شده با تابع توزیع تجمعی داده‌های مشاهده‌ای در دوره پایه مقایسه و تابع انتقال بین دو توزیع استخراج می‌شود. سپس، این تابع برای اصلاح داده‌های دوره آینده اعمال می‌شود تا اختلاف آماری بین داده‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای کاهش یابد (Gudmundsson et al., 2012).

مدل‌سازی رفتاری عامل‌های اصلی

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، در مدل ABM-AI، از دو مدل برای مدل‌سازی رفتار کشاورزان استفاده می‌شود.

در مدل اول، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین میزان تمایل کشاورزان در تغییر سامانه آبیاری خود از حالت سنتی به نوین محاسبه می‌شود.

در مدل دوم، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی به‌منظور پیش‌بینی تمایل کشاورزان به حفظ منابع آب با کاشت محصولات کشاورزی کم‌آبر محاسبه می‌شود. در ادامه، هر یک از مدل‌ها شرح داده می‌شود.

مدل‌های NWP در مقیاس بزرگ در محل ایستگاه هواشناسی مورد نظر، با دقت مکانی یک درجه طول جغرافیایی و یک درجه عرض جغرافیایی به‌دست‌آمده، پس از ریز مقیاس‌سازی تصحیح و نگاشت آن‌ها، به‌منظور افزایش دقت داده‌های مدل NWP نسبت به داده‌های مشاهده‌ای انجام می‌شود (Gupta et al., 2019).

در گام بعد، به‌منظور بررسی میزان خشکسالی در منطقه، شاخص خشکسالی SPI^1 به‌عنوان یک سنجش برای توصیف وضعیت خشکسالی مورد انتظار در دوره آینده و انتقال آن به کشاورزان به کار می‌رود. به‌گونه‌ای که بتوانند تصمیمات خود را با توجه به شرایط پیش‌بینی شده اتخاذ کنند.

شاخص SPI در سال ۱۹۹۵ توسط McKee و همکارانش ارائه شد. این شاخص بر پایه بارش، طی یک دوره زمانی خاص و نسبت به میانگین آن دوره محاسبه می‌شود. هدف اصلی SPI، ارائه یک چارچوب برای اندازه‌گیری و مقایسه خشکسالی‌ها در زمان و مکان‌های گوناگون است. بدین منظور ابتدا داده‌های بارش در یک منطقه مشخص برای یک دوره زمانی جمع‌آوری می‌شود. سپس، میانگین و انحراف معیار بارش طی دوره زمانی مورد نظر محاسبه می‌شود.

برای محاسبه SPI، از توزیع نرمال استاندارد استفاده می‌شود (رابطه ۱). در این معادله، X مقدار بارش، μ میانگین بارش و σ انحراف معیار بارش است (McKee et al., 1993).

$$SPI = \frac{(X - \mu)}{\sigma} \quad (1)$$

بر پایه شاخص خشکسالی به‌دست‌آمده از گام پیش، اگر وضعیت خشکسالی شدید باشد، بر مبنای مدل رفتاری کشاورز، او یا خود را با شرایط خشکسالی وفق می‌دهد و تصمیم می‌گیرد که در مصرف آب صرفه‌جویی کند یا اهداف مالی خود را دنبال می‌کند. مدل در گام بعد، تصمیم کشاورز

¹ Standardized Precipitation Index

مدل سازی رفتار کشاورزان با الگوریتم درخت تصمیم

با توجه به چالش‌های رو به افزایش مرتبط با کمبود آب و کشاورزی پایدار، درک رفتار کشاورزان و قصد آن‌ها در مصرف آب، اهمیت زیادی دارد.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین به عنوان ابزاری قدرتمند به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده و یافتن الگوهای رفتاری انسان شناخته شده‌اند (Plonsky et al., 2019).

در این پژوهش، به منظور مدل سازی رفتار کشاورزان در چارچوب مدل عامل - بنیان، از روش‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. هدف از به کارگیری این روش‌ها، پیش‌بینی رفتار کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت مصرف آب، تغییر سامانه آبیاری و انتخاب الگوی کشت است.

داده‌های مورد نیاز این بخش از منابع گوناگونی شامل پرسش‌نامه‌های تکمیل شده توسط کشاورزان، اطلاعات سازمان جهاد کشاورزی، داده‌های اقلیمی و اطلاعات مربوط به محصولات کشاورزی گردآوری می‌شود.

در مدل یادگیری ماشین، متغیرهای ورودی شامل مجموعه‌ای از ویژگی‌های فردی، اقتصادی و مدیریتی کشاورزان در نظر گرفته می‌شود.

این متغیرها شامل سن کشاورز، سطح تحصیلات، میزان درآمد، سطح زیر کشت، نوع محصول کشت شده، نوع سامانه آبیاری، میزان دسترسی به منابع آب، هزینه‌های کشاورزی، میزان تسهیلات مالی، وضعیت اقتصادی کشاورزان، وضعیت خشکسالی منطقه و داده‌های مربوط به شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی است. علاوه بر این، اطلاعات مربوط به مساحت زیر کشت محصولات گوناگون و تغییرات سامانه آبیاری نیز به عنوان متغیرهای مؤثر در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این متغیرها به عنوان داده‌های ورودی به مدل یادگیری ماشین وارد می‌شوند و نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار کشاورزان ایفا می‌کنند. متغیر خروجی در مدل یادگیری

ماشین، تمایل کشاورزان به تغییر سامانه آبیاری از روش سنتی به روش‌های نوین در نظر گرفته می‌شود. این متغیر به صورت یک مسئله طبقه‌بندی تعریف می‌شود و رفتار کشاورزان در دو گروه تغییر سامانه آبیاری و عدم تغییر سامانه آبیاری طبقه‌بندی می‌شود. هدف از این مرحله، پیش‌بینی تصمیم کشاورزان در شرایط گوناگون اقتصادی، اجتماعی و اقلیمی است تا بتوان رفتار آن‌ها را در چارچوب مدل عامل - بنیان شبیه سازی کرد. به منظور مدل سازی رفتار کشاورزان، الگوریتم‌های گوناگون یادگیری ماشین شامل درخت تصمیم، جنگل تصادفی و الگوریتم تقویت گرادیان شدید^۱ استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها به دلیل توانایی در شناسایی روابط غیرخطی میان متغیرها و عملکرد مناسب در مسائل طبقه‌بندی انتخاب می‌شوند.

داده‌های آماده سازی شده به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم می‌شود، به طوری که بخش آموزش برای یادگیری مدل و بخش آزمون برای ارزیابی عملکرد آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از آموزش مدل‌ها، عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند دقت، معیار بازخوانی، معیار F و ماتریس درهم‌ریختگی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مدلی که عملکرد بهتری دارد به عنوان مدل نهایی انتخاب می‌شود.

خروجی مدل یادگیری ماشین در مدل عامل - بنیان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرایند، ابتدا تمایل کشاورزان به تغییر سامانه آبیاری با استفاده از مدل یادگیری ماشین پیش‌بینی می‌شود. سپس در صورت تمایل کشاورزان به تغییر سامانه آبیاری، وضعیت اقتصادی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در صورتی که کشاورز توان مالی لازم را برای تغییر سامانه آبیاری داشته باشد، اقدام به تغییر سامانه آبیاری می‌کند و در غیر این صورت سامانه آبیاری قبلی حفظ می‌شود. این فرایند در طول دوره شبیه سازی برای همه کشاورزان تکرار می‌شود

¹ Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

دشت اردبیل در مدل‌سازی رفتار کشاورزان استفاده می‌شود. شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های مربوط به این محصولات آموزش داده شده تا رفتار کشاورزان در انتخاب الگوی کشت پیش‌بینی شود.

در پژوهش حاضر، به‌منظور تعیین ساختار مناسب شبکه عصبی مصنوعی، چندین مدل با ترکیب‌های متفاوت از پارامترهای شبکه طراحی و اجرا می‌شود.

در این فرایند، پارامترهایی مانند تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نورون‌ها در هر لایه، نرخ یادگیری و نوع تابع فعال‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند تا مناسب‌ترین ساختار برای پیش‌بینی رفتار کشاورزان انتخاب شود. پس از آموزش هر یک از مدل‌ها، عملکرد آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی می‌شود و در نهایت مدلی که از دقت بالاتری برخوردار است به‌عنوان مدل منتخب انتخاب می‌شود. این مدل به‌عنوان یکی از زیرمدل‌های رفتاری در چارچوب مدل عامل‌مبنا مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی شبکه عصبی مصنوعی در فرایند شبیه‌سازی رفتار کشاورزان به کار گرفته می‌شود.

در مدل عامل‌مبنا، ابتدا شرایط اقتصادی کشاورزان و وضعیت منابع آب و شرایط اقلیمی منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از خروجی مدل شبکه عصبی، رفتار کشاورزان در انتخاب محصولات کشاورزی گوناگون پیش‌بینی می‌شود. این فرایند در طول دوره شبیه‌سازی و در سناریوهای گوناگون مدیریتی تکرار می‌شود تا تغییرات رفتار کشاورزان در شرایط متفاوت مورد تحلیل قرار گیرد. به این ترتیب، امکان بررسی تأثیر سیاست‌های مدیریتی و شرایط محیطی بر رفتار کشاورزان و وضعیت منابع آب فراهم می‌شود.

به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی در کنار دیگر روش‌های یادگیری ماشین، دقت پیش‌بینی رفتار کشاورزان را افزایش می‌دهد. در مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌ی عصبی مصنوعی ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌ها یک مرحله‌ی مهم است. این شاخص‌ها کمک می‌کنند تا به طور

و تغییرات رفتار کشاورزان در طول زمان مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مدل‌سازی رفتار کشاورزان با شبکه عصبی مصنوعی

در این پژوهش، علاوه بر الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از شبکه عصبی مصنوعی نیز برای مدل‌سازی رفتار کشاورزان استفاده می‌شود.

هدف از استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پیش‌بینی تمایل کشاورزان به حفظ منابع آب و انتخاب محصولات کم‌آب‌بر است. شبکه عصبی مصنوعی به دلیل توانایی در یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی، به‌عنوان یکی از ابزارهای مناسب برای مدل‌سازی رفتار کشاورزان است.

برای پیاده‌سازی مدل شبکه عصبی مصنوعی، از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط Google Colab استفاده می‌شود.

در این مدل، ابتدا مجموعه داده شامل داده‌های مشخصه و برچسب آماده‌سازی می‌شود. داده‌های ورودی شبکه عصبی شامل اطلاعات مربوط به ویژگی‌های کشاورزان، اطلاعات اقتصادی، داده‌های مربوط به محصولات کشاورزی، نوع سامانه آبیاری، شرایط اقلیمی و وضعیت منابع آب است. همچنین، داده‌های مربوط به سطح زیر کشت محصولات گوناگون و اطلاعات مربوط به رفتار کشاورزان در سال‌های گذشته نیز در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه مدل شبکه عصبی مصنوعی تمایل کشاورزان به انتخاب محصولات کم‌آب‌بر و مشارکت در حفاظت از منابع آب به دست می‌آید. این متغیر خروجی در قالب یک مسئله طبقه‌بندی تعریف شده که در آن رفتار کشاورزان بر پایه نوع محصول انتخابی پیش‌بینی می‌شود.

در این پژوهش، ۹ محصول شامل گندم، سیب‌زمینی، جو، چغندر، نخود، لوبیا، کلزا، عدس و یونجه با توجه به کشت در

کمی و کم‌هزینه عملکرد مدل‌ها ارزیابی شده، مقایسه‌ای ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه عصبی مصنوعی که معنادار بین آن‌ها برقرار بشود. در جدول ۳، شاخص‌های

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه عصبی مصنوعی

Table 1. Evaluation metrics for machine learning and artificial neural network models

مرجع Reference	کاربرد Application	خروجی Output	ورودی Input	شاخص Indicator
(Géron, 2022)	بررسی عملکرد مدل در شناسایی تمایل کشاورزان به حفظ منابع آب	تعداد TP, TN, FP, FN	برچسب واقعی و پیش‌بینی شده تمایل کشاورز	ماتریس درهم‌ریختگی (Confusion matrix)
(Bishop & Nasrabadi, 2006)	ارزیابی صحت پیش- بینی‌های مثبت (کشاورزان متمایل به حفظ منابع آب)	$TP/(TP + FP)$	FP و TP	دقت (Precision)
(Bishop & Nasrabadi, 2006)	سنجش توان مدل در شناسایی کشاورزان دارای تمایل واقعی	$TP/(TP + FN)$	FP و TP	بازخوانی (Recall)
(Géron, 2022)	ایجاد تعادل بین دقت و بازخوانی در ارزیابی مدل	$2 * \frac{Precision * Recall}{(Precision + Recall)}$	Precision و Recall	شاخص F (F-score)
(Géron, 2022)	سنجش درصد کل پیش‌بینی‌های صحیح مدل	$\frac{(TP + TN)}{کل}$	پیش‌بینی‌ها	شاخص درستی (Accuracy)
(Bishop & Nasrabadi, 2006)	ارزیابی میزان تطابق مدل با داده‌های واقعی	$1 - (\frac{SS_{res}}{SS_{tot}})$	مقادیر پیش‌بینی و واقعی	ضریب تعیین R2 (R-Squared)
(Willmott & Matsuura, 2005)	سنجش میزان خطای پیش‌بینی مدل در برآورد تمایل به حفظ منابع آب	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	مقادیر پیش‌بینی و واقعی	میانگین مجموع مربعات خطا ^{۲۵} (MSE)

SSres و SStot به ترتیب، مجموع مربعات خطای باقیمانده و مجموع مربعات خطای کل و n ، y_i و $\hat{y}_i$ به ترتیب، تعداد

داده‌ها، مقدار واقعی متغیر وابسته و مقدار پیش‌بینی شده متغیر وابسته را توسط مدل نشان می‌دهند.

denote the residual sum of squares and the total sum of squares, respectively, and n , y_i , and $\hat{y}_i$ denote the number of data points, the actual value of the dependent variable, and the value of the dependent variable predicted by the model, respectively.

²⁵ Mean Squared Error

شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی

در این مقاله، برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی از روش محاسبه‌ی بیلان آب زیرزمینی استفاده می‌شود. با محاسبه‌ی میزان نیاز شرب، صنعت و محیط‌زیست و کسر آن از منابع آب زیرزمینی موجود، با استفاده از نیاز خالص محصولات کشاورزی و سطح زیر کشت در منطقه، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی برای مصارف کشاورزی محاسبه می‌شود.

با تغییر سطح زیر کشت یا الگوی کشت، مقدار برداشت از منابع آب نیز تغییر می‌کند. به‌طور کلی، معادله‌ی بیلان آب زیرزمینی به‌صورت رابطه ۲ است.

$$\begin{aligned} R - D &= \Delta V \\ R &= Q_{in} + Q_q + Q_i + Q_r + Q_e \\ D &= Q_{out} + Q_p + Q_E + Q_d \end{aligned} \quad (2)$$

در این رابطه، R برابر مجموع آب‌های وارده به سفره آب زیرزمینی، D مجموع آب‌های خروجی از آبخوان، ΔV تغییرات ذخیره دینامیک سفره، A وسعت منطقه بیلان، S ضریب ذخیره آبخوان، Q_{in} دبی ورودی آب‌های زیرزمینی، Q_p نفوذ از بارندگی به آبخوان از سطح دشت، Q_i حجم آب برگشتی آبیاری به سفره، Q_r حجم نفوذ ناشی از جریان‌های سطحی و سیلابی به سفره، Q_e حجم تغذیه از طریق نفوذ فاضلاب و Q_{out} میزان دبی خروجی از سفره آب زیرزمینی است.

داده‌های ورودی مدل، مؤلفه‌های اصلی بیلان آب زیرزمینی به همراه میانگین سالانه آن‌ها در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در جدول ۴ ارائه شده است. داده‌های مورد استفاده از سازمان هواشناسی کشور، شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل جمع‌آوری شده است.

جدول ۴. مقدار میانگین سالانه ورودی و خروجی بیلان (Ardabil Regional Water Company, 2015)

Table A3. Annual Average Values of Water Balance Inputs and Outputs (Ardabil Regional Water Company, 2015)

مؤلفه Component	نماد Symbol	میانگین سالانه (میلیون متر مکعب) Annual Average (million m ³)
دبی ورودی آب‌های زیرزمینی Groundwater inflow	(Q _{in})	89.6
نفوذ ناشی از بارندگی به آبخوان Rainfall infiltration into the aquifer	(Q _q)	14.5
حجم آب برگشتی آبیاری به سفره Irrigation return flow to the aquifer	(Q _R)	22.6
نفوذ ناشی از جریان‌های سطحی و سیلابی Infiltration from surface flows and floods	(Q _e)	12.9
دبی خروجی آب‌های زیرزمینی Groundwater outflow	(Q _{out})	1.16
تبخیر از آبخوان Evaporation from the aquifer	(Q _E)	10.4
تخلیه طبیعی آبخوان Natural aquifer discharge	(Q _d)	0.39

تدوین سناریوهای مدیریتی و انتخاب سناریوی برتر

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر سیاست‌های مدیریتی بر رفتار کشاورزان و وضعیت منابع آب، سناریوهای مدیریتی گوناگونی تدوین می‌شود. این سناریوها بر پایه شرایط منطقه مطالعاتی، محدودیت منابع آب، ویژگی‌های اقتصادی کشاورزان و سیاست‌های مدیریتی قابل اجرا تدوین می‌شوند. در این راستا، راهکارهای مدیریتی به دو دسته کلی راهکارهای اجباری و راهکارهای اختیاری تقسیم می‌شوند و سپس با ترکیب این راهکارها، سناریوهای گوناگون مدیریتی طراحی و در مدل شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

راهکارهای اجباری شامل سیاست‌هایی هستند که از سوی نهادهای مدیریتی اعمال می‌شوند و کشاورزان ملزم به رعایت آن‌ها هستند. این راهکارها معمولاً با هدف کنترل برداشت از منابع آب و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تدوین می‌شوند. از جمله مهم‌ترین راهکارهای اجباری می‌توان به آگاه‌سازی و تبلیغات از طریق رسانه‌ها درباره پیامدهای ناشی از کمبود آب و خشکسالی از جمله فرونشست زمین و خطرات آن، کاهش محصولات کشاورزی و کاهش توان اقتصادی کشاورزان و آبخیزداری اشاره کرد. این سیاست‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که مصرف آب در بخش کشاورزی کاهش یافته و فشار بر منابع آب زیرزمینی کمتر شود.

در برابر، راهکارهای اختیاری شامل سیاست‌هایی هستند که با ارائه مشوق‌ها و حمایت‌های اقتصادی، کشاورزان را به تغییر رفتار و استفاده از روش‌های پایدارتر ترغیب می‌کنند. این راهکارها شامل، یکپارچه‌سازی زمین‌ها، تعیین قیمت‌های مناسب خرید محصولات کشاورزی کم‌آب‌بر از کشاورزان، تشویق کشاورزان زیر خط فقر به کاشت محصولات کم‌آب‌بر از طریق اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره و اعطای وام به همه کشاورزان است.

در این روش، کشاورزان بر پایه شرایط اقتصادی و تمایل شخصی خود نسبت به اجرای این راهکارها اقدام می‌کنند.

پس از تعریف راهکارهای اجباری و اختیاری، سناریوهای مدیریتی با ترکیب این راهکارها تدوین می‌شوند.

در این پژوهش، ۱۱ سناریوی مدیریتی بر پایه ترکیب شش راهکار پایه شامل آگاه‌سازی و تبلیغات، آبخیزداری، یکپارچه‌سازی زمین‌ها، قیمت‌های تضمینی، اعطای وام به کشاورزان نیازمند و اعطای وام به همه کشاورزان تدوین می‌شود. سناریوهای ۱ تا ۴ تنها راهکارهای اجباری (آگاه‌سازی و آبخیزداری) را به همراه یکی از راهکارهای اختیاری شامل می‌شوند. هدف از این دسته، بررسی این نکته است که افزودن هر یک از مشوق‌های اقتصادی (یکپارچه‌سازی، قیمت تضمینی، وام به نیازمندان، وام به همه کشاورزان) به تنهایی، چه تأثیری بر رفتار کشاورزان دارد. سناریوهای ۵ تا ۷ علاوه بر راهکارهای اجباری، یکپارچه‌سازی زمین‌ها را نیز به عنوان بستر اولیه اجرا در نظر گرفته می‌شود و سپس هر یک از مشوق‌های اقتصادی (وام) را به طور جدا به آن اضافه می‌شود. هدف از این دسته، ارزیابی اثر مشوق‌ها در شرایطی است که ساختار اراضی یکپارچه شده باشد. سناریوهای ۸ تا ۱۱ ترکیب هم‌زمان دو یا چند مشوق اقتصادی را با راهکارهای اجباری بررسی می‌کنند. هدف از این دسته، یافتن یک ترکیب اقتصادی مقرون به صرفه است که بیشترین تأثیر را بر کاهش برداشت آب و بهبود الگوی کشت داشته باشد. پس از اجرای سناریوهای گوناگون در طول دوره شبیه‌سازی، انتخاب سناریوی برتر بر پایه دو معیار انجام می‌شود:

(۱) میزان تأثیر هر سناریو بر بهبود وضعیت آبخوان که با شاخص‌هایی مانند میزان کاهش برداشت از چاه‌ها و کاهش نرخ افت تراز آب زیرزمینی سنجیده می‌شود.

(۲) منابع مالی مورد نیاز برای پیاده‌سازی هر سناریو که شامل هزینه‌های تبلیغات و آگاه‌سازی، هزینه‌های آبخیزداری، هزینه تعیین قیمت‌های تضمینی و هزینه اعطای وام و تسهیلات به کشاورزان است.

خلاصه سناریوها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. سناریوهای مدیریتی تعریف شده در مدل

Table 5. Management Scenarios Defined in the Model

اعطای وام به تمامی کشاورزان Loans to All Farmers	اعطای وام به کشاورزان نیازمند Loans to Farmers in Need	قیمت‌های تضمینی Guaranteed Prices	یکپارچه‌سازی اراضی Land Consolidation	آبخیزداری Watershed Management	آگاه‌سازی و تبلیغات Awareness and Publicity	ردیف Scenario
			✓	✓	✓	سناریوی ۱ Scenario 1
		✓		✓	✓	سناریوی ۲ Scenario 2
	✓			✓	✓	سناریوی ۳ Scenario 3
✓				✓	✓	سناریوی ۴ Scenario 4
		✓	✓	✓	✓	سناریوی ۵ Scenario 5
	✓		✓	✓	✓	سناریوی ۶ Scenario 6
✓			✓	✓	✓	سناریوی ۷ Scenario 7
	✓	✓		✓	✓	سناریوی ۸ Scenario 8
✓		✓		✓	✓	سناریوی ۹ Scenario 9
	✓	✓	✓	✓	✓	سناریوی ۱۰ Scenario 10
✓		✓	✓	✓	✓	سناریوی ۱۱ Scenario 11

نتایج و بحث

جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که مدل جنگل تصادفی از دیگر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد. در نتیجه، در مدل عامل‌بنیان معرفی شده در این مقاله، به‌منظور پیش‌بینی رفتار عامل‌های کشاورز در انتخاب نوع سامانه آبیاری، از این مدل استفاده می‌شود.

پس از آماده‌سازی داده‌های آموزش و آزمون، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط کدنویسی^۱ Google Colab مدل‌ها ساخته شد. نتایج به دست آمده از هر یک از مدل‌های ساخته شده در

¹ Integrated Development Environment (IDE)

جدول ۶. خلاصه نتایج مدل‌های یادگیری ماشین

Table 6. Summary of results for machine learning models

نام مدل (Model)	شاخص درستی (Accuracy)	شاخص F (F-score)	بازخوانی (Recall)	ماتریس درهم‌ریختگی (Confusion Matrix)	دقت (Precision)
جنگل تصادفی Random Forest	0.82	0.86	0.84	[[17 58]] [[126 24]]	0.88
XGBoost	0.86	0.83	0.79	[[15 60]] [[118 32]]	0.89
درخت تصمیم Decision Tree	0.77	0.81	0.75	[[15 60]] [[113 37]]	0.88

ابتدا داده‌های موجود به دو دسته‌ی داده‌های آموزش و آزمون تقسیم شدند.

در پژوهش، ۳۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده‌های آزمون و ۷۰ درصد از داده‌ها به‌عنوان داده آموزش در نظر گرفته شدند. مشخصه‌های استفاده شده در این مدل به‌منظور پیش‌بینی رفتار کشاورزان در انتخاب نوع محصول نگرش، هنجار اجتماعی و تصور از میزان کنترل بر رفتار هستند. برچسب استفاده شده در این مدل مقدار تمایل کشاورز در شرکت در فعالیت‌های حفاظت از آب است.

به‌منظور به‌دست‌آوردن مشخصه‌های استفاده شده در این مدل از پرسش‌نامه‌های پر شده توسط کشاورزان استفاده است. به‌منظور پیدا کردن بهترین فرایپارامترها برای مدل شبکه عصبی مصنوعی، ۱۸ مدل آماده و اجرا شد. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌های ساخته شده، مدل شماره ۱۱ به‌عنوان مدل برتر انتخاب می‌شود. مقدار ضریب تعیین^۱ (R^2) برای داده‌های آموزش و آزمون در مدل منتخب به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۴ است. با توجه به این که مقدار این شاخص برای داده‌های آموزش قابل قبول است، مدل توانسته است بر پایه داده‌ها آموزش ببیند و مدل کم برازش^۲ نشده است.

بررسی ماتریس‌های درهم‌ریختگی نشان می‌دهد که گرچه مدل XGBoost تعداد بیشتری از نمونه‌های کلاس منفی را به‌درستی شناسایی کرده است، مدل جنگل تصادفی در شناسایی نمونه‌های کلاس مثبت عملکرد بهتری داشته و تعداد نمونه‌های مثبت صحیح بیشتری را نسبت به دیگر مدل‌ها تشخیص داده است. همچنین، تعداد خطاهای نوع دوم در مدل جنگل تصادفی کمتر از مدل XGBoost بوده است که این موضوع منجر به افزایش مقدار Recall و در نتیجه، بهبود شاخص F-score شده است.

از آنجا که در این پژوهش، شناسایی صحیح رفتار کشاورزان برای استفاده در مدل عامل - بنیان اهمیت بیشتری نسبت به پیشینه‌سازی صرف Accuracy دارد، مدل جنگل تصادفی به‌عنوان مدل منتخب به کار گرفته شد. در ادامه، به‌منظور بررسی نتایج مدل‌سازی شبکه‌ی عصبی مصنوعی ابتدا داده‌های ورودی به مدل شرح داده می‌شوند. سپس، مراحل آماده‌سازی مدل و انتخاب فرایپارامترهای مناسب شرح داده می‌شود. در نهایت، نتایج مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی ارائه و تحلیل می‌شود.

به‌منظور آماده‌سازی مدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در این مقاله، ابتدا، مجموعه داده‌ای شامل داده‌های مشخصه و برچسب آماده شدند. به‌منظور آماده‌سازی مدل،

² Underfit¹ Coefficient of Determination

به استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین، کشاورزان بیش‌تری تمایل به استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین پیدا کرده‌اند. به این منظور، از داده‌های واقعی دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل استفاده شده است. این جدول نشان می‌دهد که الگوریتم فازی طراحی شده در مدل ABM-AI برای پیش‌بینی تمایل کشاورزان به تغییر نوع سامانه آبیاری خود به‌خوبی می‌تواند رفتار آن‌ها را پیش‌بینی کند.

همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شد، سناریوهای مدیریتی حاصل تلفیق راهکارهای اجباری و اختیاری هستند. از ترکیب این دو دسته راهکار، ۱۱ سناریوی انتخابی تدوین شد. پس از پیاده‌سازی سیاست‌های انتخابی، مشخص شد که هر یک از سناریوها تا چه اندازه توانسته‌اند وضعیت آبخوان دشت اردبیل را بهبود بخشند و هم‌زمان چه تأثیری بر وضعیت اقتصادی کشاورزان منطقه داشته است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با اجرای این سناریوها در سال‌های گوناگون، میزان حجم برداشت از آبخوان کم شده، در نتیجه میزان افت نیز کاهش یافته است. با توجه به این شکل مشخص است که مقدار برداشت از چاه‌ها در سناریوهای ۴، ۸، ۹ و ۱۱ نسبت به دیگر سناریوها کمتر است.

علت کم‌بودن مقدار مصرف آب در این سناریوها نسبت به دیگر سناریوها و همچنین، مشابه بودن نمودارهای آن سال‌ها با یکدیگر، وجود راهکار تشویق همه کشاورزان به کاشت محصولات کم‌آبر از طریق اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره است. این راهکار به‌تنهایی به طور قابل توجهی میزان مصرف آب را کاهش می‌دهد. میزان تغییرات بیلان آب زیرزمینی هم در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار تغییرات حجم آب زیرزمینی در سناریوهای ۴، ۷، ۹ و ۱۱ به دلایل گفته شده نسبت به دیگر سناریوها کمتر است.

در شکل ۶، برای نمونه، تغییرات مساحت زیر کشت چهار نوع محصول کشاورزی برای سناریوها نشان داده شده است. در این شکل، مقادیر مساحتی که به کشت هر کدام از

مدل شبکه عصبی مصنوعی به‌کاررفته دارای شش‌لایه است. لایه‌های تشکیل‌دهنده در این مدل به ترتیب لایه‌ی ورودی، لایه‌ی خروجی و چهارلایه‌ی پنهان است. در هر یک از لایه‌ها به ترتیب سه، ۹، ۶ و ۳ نورون وجود دارد.

در مدل پیشنهادی منتخب، به‌منظور دستیابی به جواب بهینه، روند بهینه‌سازی پارامترها ۱۹۰ بار تکرار شده است و اندازه‌ی مجموعه در هر تکرار ۵۱ است. به‌منظور بررسی دقت خروجی‌های مدل عامل‌بنیان از شاخص‌های NRMSE و نش - ساتکلیف استفاده شد.

در جدول ۷، مقدارهای این شاخص‌ها برای برداشت از چاه و تغییرات حجم آبخوان و انتخاب سامانه آبیاری نشان داده شده است.

تحلیل داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده با استفاده از شاخص‌های گفته شده نشان می‌دهد که مدل‌های عامل‌بنیان و مدل رفتاری به کار رفته شده در آن‌ها در مدل‌سازی دشت اردبیل عملکرد قوی‌ای دارند. در جدول ۸، مقادیر فراپارامترهای مدل جنگل تصادفی و شبکه عصبی ارائه شده است.

در شکل ۳، تعداد کشاورزانی که در بازه مدل‌سازی، نوع سامانه آبیاری آن‌ها سنتی بوده است، نشان داده شده است. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که با گذشت زمان، تعداد کشاورزانی که تمایل به استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین دارند، رو به افزایش است.

علت صعودی بودن تعداد کشاورزانی که نوع سامانه آبیاری خود را از سنتی به نوین تغییر داده‌اند، کاهش منابع آب آبخوان و حمایت سازمان‌های دولتی است

به دلیل افت شدید سطح آبخوان و در دسترس نبودن آب کافی، کشاورزان مجبور می‌شوند از سامانه‌های آبیاری‌ای استفاده کنند که مصرف آب آن‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین، با توجه به اعطای وام به کشاورزان از طرف سازمان جهاد کشاورزی و انجام تبلیغات در راستای تشویق کشاورزان

محصولات کشت شده در منطقه اختصاص یافته است، در سناریوهای گوناگون در مدل نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۶ مشخص است که مقادیر سطح زیر کشت گندم در سناریوهای اجرایی، با توجه به فروش تضمینی، به یکدیگر نزدیک هستند. این نتایج نشان می‌دهند که اجرای سیاست‌ها و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی منجر به افزایش مساحت کشت گندم در زمین‌های گوناگون شده است. با توجه به این شکل، عملکرد همه سناریوها در روند کشت گندم به طور تقریبی یکسان است.

در تحلیل سناریوهای گوناگون، مشاهده می‌شود که کاهش معنی‌داری در مقدار کشت این محصول در سال‌های اخیر نسبت به سال‌های ابتدایی مدل‌سازی قابل مشاهده است. این واقعیت نشان می‌دهد که سناریوهای اجرایی و اقدامات پیش‌بینی شده به منظور حفاظت و پایدارسازی منابع آب در منطقه دشت اردبیل به خوبی پیش می‌روند، چرا که منجر به کاهش محسوس در کشت سیب‌زمینی شده است.

در دشت اردبیل، محصول یونجه تنها محصول کشاورزی است که در یک سال آبی دو بار برداشت می‌شود؛ سناریوهایی که با هدف کاهش مصرف یونجه اجرا شده‌اند، به خوبی در ارتقای پایداری منطقه عمل کرده‌اند.

جو به عنوان یک گزینه مناسب در مدیریت منابع آب شناخته می‌شود. در دشت اردبیل، با اجرای سناریوهای گوناگون، مشاهده می‌شود که تمایل کشاورزان به کشت این محصول افزایش یافته است. افزایش تمایل به کاشت این محصول نشان‌دهنده تأثیر مثبت اقداماتی است که در راستای تشویق کشاورزان به کشت محصولات کم‌آب و پایدار در منطقه انجام شده است.

شکل ۷ تعداد کشاورزانی را نشان می‌دهد که در مدل ABM-AI سامانه آبیاری نوین را انتخاب کرده‌اند. در این مدل، کشاورزان در سناریوهای گوناگون به چهار گروه تقسیم شده‌اند. در سناریوهایی که در آن‌ها، تشویق کشاورزان به

کاشت محصولات کم‌آب‌بر با اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره وجود دارد (سناریوهای ۴، ۷، ۹ و ۱۱)، در مدل، همه کشاورزان نوع سامانه آبیاری خود را از سنتی به نوین تغییر داده‌اند. همچنین، تعداد کشاورزانی که سامانه آبیاری نوین را در مدل‌سازی انتخاب کرده‌اند، در سناریوهای ۱ و ۵ تقریباً با یکدیگر مشابه هستند. با توجه به شکل ۷، راهکار ارائه قیمت‌های تضمینی تأثیر قابل توجهی بر تشویق و حمایت کشاورزان در استفاده از سامانه آبیاری نوین ندارد. همچنین، تعداد کشاورزانی که سامانه آبیاری نوین را در مدل‌سازی انتخاب کرده‌اند، در سناریوهای ۳ و ۸ به طور تقریبی با یکدیگر مشابه هستند. با توجه به نتایج مدل‌سازی سناریوی ۱۰، راهکارهای اعطای وام به کشاورزان نیازمند و همچنین، راهکار یکپارچه‌سازی زمین‌ها تأثیر بیشتری بر تصمیم کشاورزان در بهبود سامانه آبیاری دارند.

سناریوی ۲ تنها سناریویی است که عملکردی مشابه دیگر سناریوها ندارد. راهکار اصلی در این سناریو قیمت تضمینی است و این سناریو نسبت به دیگر سناریوهای مدل‌سازی شده عملکرد ضعیف‌تری دارد.

در کل، عملکرد سناریوی چهارم از نظر بهبود وضعیت آبخوان از دیگر سناریوها بهتر است. به طور کلی، سناریوهایی که در آن‌ها، از راهکار اختیاری تشویق همه کشاورزان به کاشت محصولات کم‌آب‌بر از طریق اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره استفاده شده است، عملکرد بهتری داشته‌اند. در عین حال، باید توجه داشت که هزینه اجرایی سناریوی چهارم یا به طور کلی، سناریوهایی که در آن‌ها از راهکار اختیاری تشویق همه کشاورزان به کاشت محصولات کم‌آب‌بر با اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره استفاده شده است، بسیار زیاد است. در نتیجه، سناریوی چهارم با این که عملکرد بسیار خوب در راستای هدف این پژوهش دارد، سناریوی برتر نیست.

بر پایه نتایج، از منظر اقتصادی، نتایج نشان داد سناریوهای مبتنی بر حمایت‌های مالی و تعیین قیمت‌های

مشاهده می‌شود که مقدار کشت چغندر به طرز قابل توجهی کاهش یافته است.

با توجه به شکل ۶، تمایل کشاورزان به کاشت این محصول در سال‌های اخیر بیشتر شده است و اجرای سناریوهای گوناگون تأثیر قابل توجهی در کاهش کاشت این محصول نداشته است. در سال‌های اخیر، فاصله درآمد کشاورزان با خط فقر در مقایسه با سال‌های گذشته بیش‌تر شده است. در نتیجه، کشاورزان به دلیل پرسود بودن این محصول در راستای افزایش درآمد خود این محصول را کشت می‌کنند. با توجه به مصاحبه‌های انجام شده، کشاورزان دشت اردبیل به‌طور کلی، تمایل چندانی به کشت محصولات لوبیا، نخود، عدس و کلزا ندارند. این مسئله موجب شده تا سطح زیر کشت این محصولات در دشت نسبت به دیگر محصولات بسیار کمتر باشد.

شکل ۶ به‌وضوح نشان می‌دهد که سناریوهای اجرایی با موفقیت در افزایش تمایل به کشت این محصولات تأثیرگذار بوده‌اند و منجر به دستیابی به پایداری بیشتر آبخوان اردبیل شده‌اند.

تضمینی، علاوه بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی، توانستند درآمد کشاورزان را در سطح قابل قبولی حفظ کنند. در مقابل، برخی سناریوها گرچه موجب کاهش مصرف آب شدند، به دلیل افزایش هزینه‌های اجرایی یا کاهش جذابیت اقتصادی برخی محصولات، از نظر اقتصادی، پایداری کمتری داشتند. به همین دلیل، سناریوی هشتم به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شد؛ زیرا ضمن بهبود وضعیت آبخوان، تعادل مناسبی میان حفاظت از منابع آب و حفظ منافع اقتصادی کشاورزان برقرار کرد.

سناریوی هشتم پس از سناریوهایی که راهکارهای تشویق همه کشاورزان را به کاشت محصولات کم‌آب‌بر از طریق اعطای وام و تسهیلات کم‌بهره به کار می‌گیرند، بهترین سناریو است. این سناریو شامل دو راهکار تعیین قیمت مناسب خرید محصولات کشاورزی کم‌آب‌بر از کشاورزان و اعطای وام به کشاورزان نیازمند است. میزان برداشت از چاه‌ها در سناریوی برتر نسبت به داده‌های مشاهداتی کاهش پیدا کرده است (شکل ۸-الف). همچنین، وضعیت آبخوان در سناریوی برتر نسبت به شرایط کنونی آبخوان پایداری بیشتر است (شکل ۸-ب). با اجرای سناریوهای تعریف شده در منطقه دشت اردبیل،

جدول ۷. شاخص‌های عملکرد مدل در پیش‌بینی مقدار آب برداشت شده از چاه‌ها، تغییر حجم آبخوان و انتخاب سامانه آبیاری در بازه زمانی (۲۰۰۰-۲۰۲۰)

Table 7. Model performance indicators for predicting groundwater withdrawal volume, aquifer storage change, and irrigation system selection over the period (2000–2020)

NSE	NRMSE	متغیر شبیه‌سازی شده
0.86	0.12	آب برداشت شده از چاه‌ها Water withdrawal from wells
0.92	0.08	تغییر حجم آبخوان Change in aquifer volume
0.90	0.085	انتخاب سامانه آبیاری Irrigation system selection

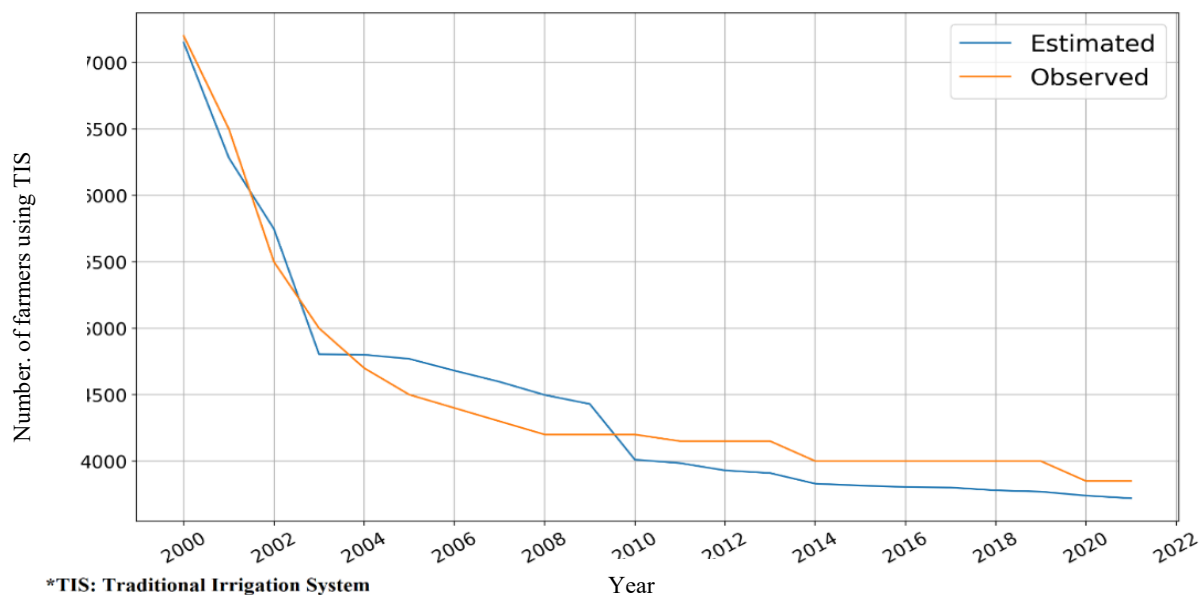
NRMSE: Normalized Root Mean Square Error

NSE: Nash–Sutcliffe Efficiency

جدول ۸. فرایپارامترهای مدل جنگل تصادفی و شبکه عصبی

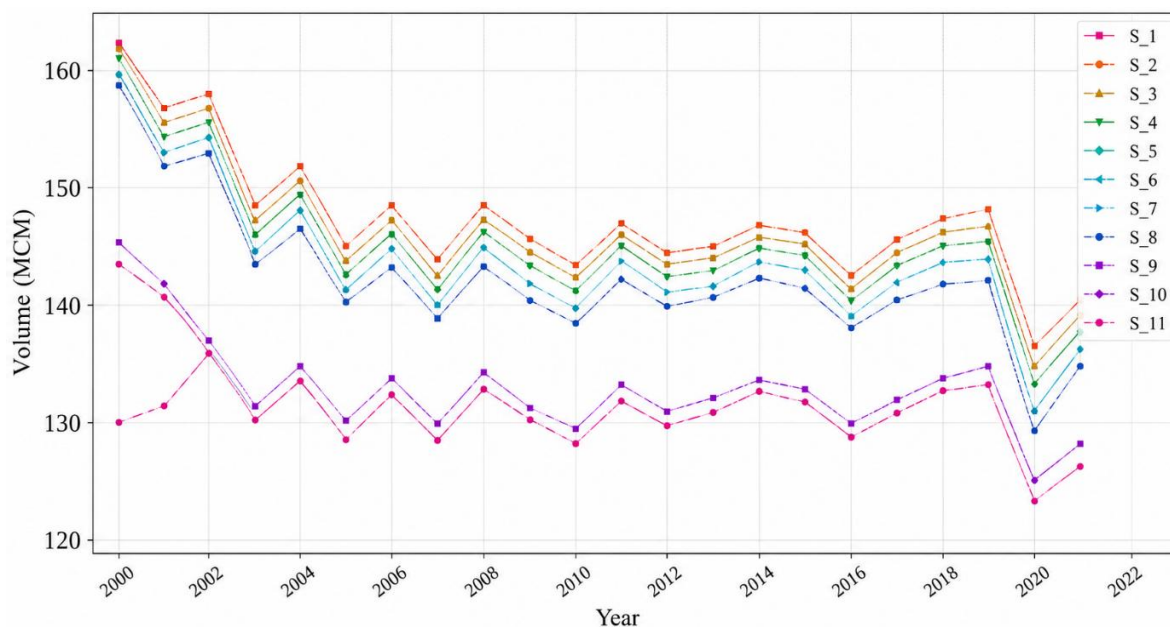
Table 8. Hyperparameters of the Random Forest and Neural Network Models

مدل شبکه عصبی مصنوعی Artificial Neural Network Model	مدل جنگل تصادفی Random Forest Model	فرایپارامترها Hyperparameters
-	100	تعداد درختها (n_Estimators)
-	10	حداکثر عمق (Max_Depth)
-	۵	حداقل نمونه برای تقسیم (Min_Samples_Split)
-	۲	حداقل نمونه در برگ (Min_Samples_Leaf)
-	'sqrt'	تعداد ویژگی‌ها برای تقسیم (Max_Features)
۴	-	تعداد لایه‌های پنهان Number of Hidden Layers
به ترتیب ۳، ۶، ۹	-	تعداد نورون‌ها در هر لایه Number of Neurons per Layer
0.01	-	نرخ یادگیری (Learning Rate)
ReLU	-	تابع فعال‌سازی Activation Function
190	-	تعداد دوره‌ها (Epochs)
51	-	حجم دسته (Batch Size)
Adam	-	تابع بهینه‌ساز Optimizer
70٪ آموزش، 30٪ آزمون	70٪ آموزش، 30٪ آزمون	نسبت تقسیم داده‌ها Data Split Ratio
اعتبارسنجی با داده‌های آزمون مستقل	اعتبارسنجی با داده‌های آزمون مستقل	روش اعتبارسنجی Validation Method



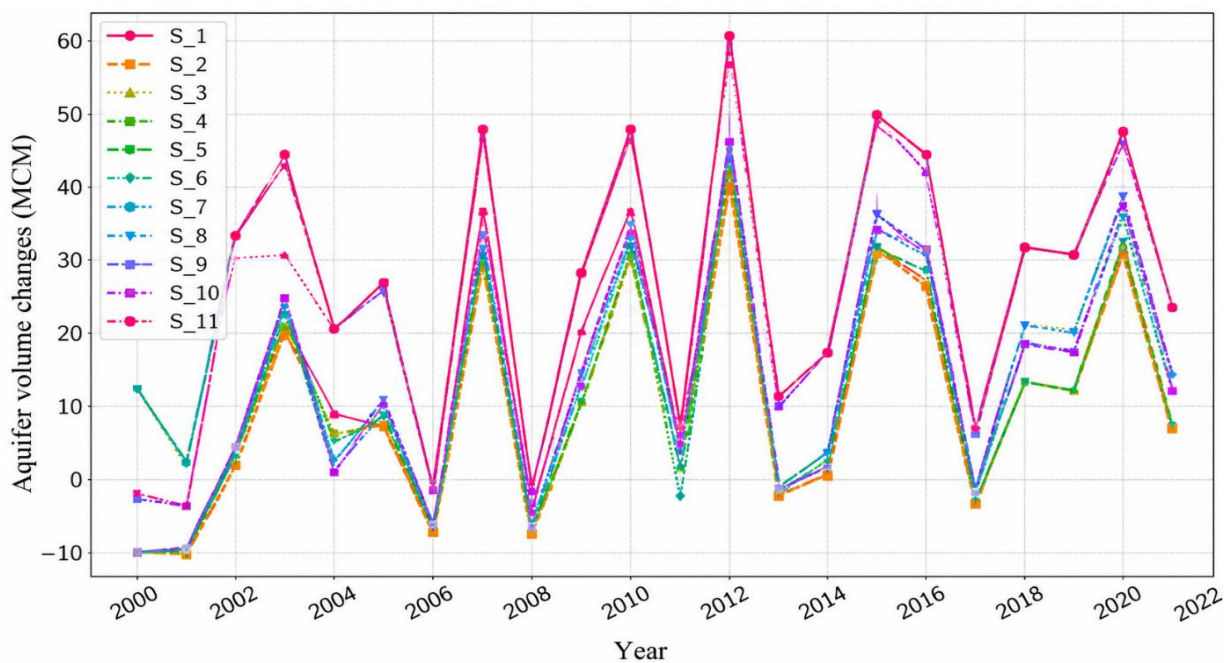
شکل ۳. مقایسه تعداد کشاورزان استفاده‌کننده از سامانه آبیاری سنتی بر پایه نتایج مدل ABM-AI و مشاهدات واقعی

Fig 3. Comparison of the number of farmers using traditional irrigation systems based on ABM-AI model results and real observations



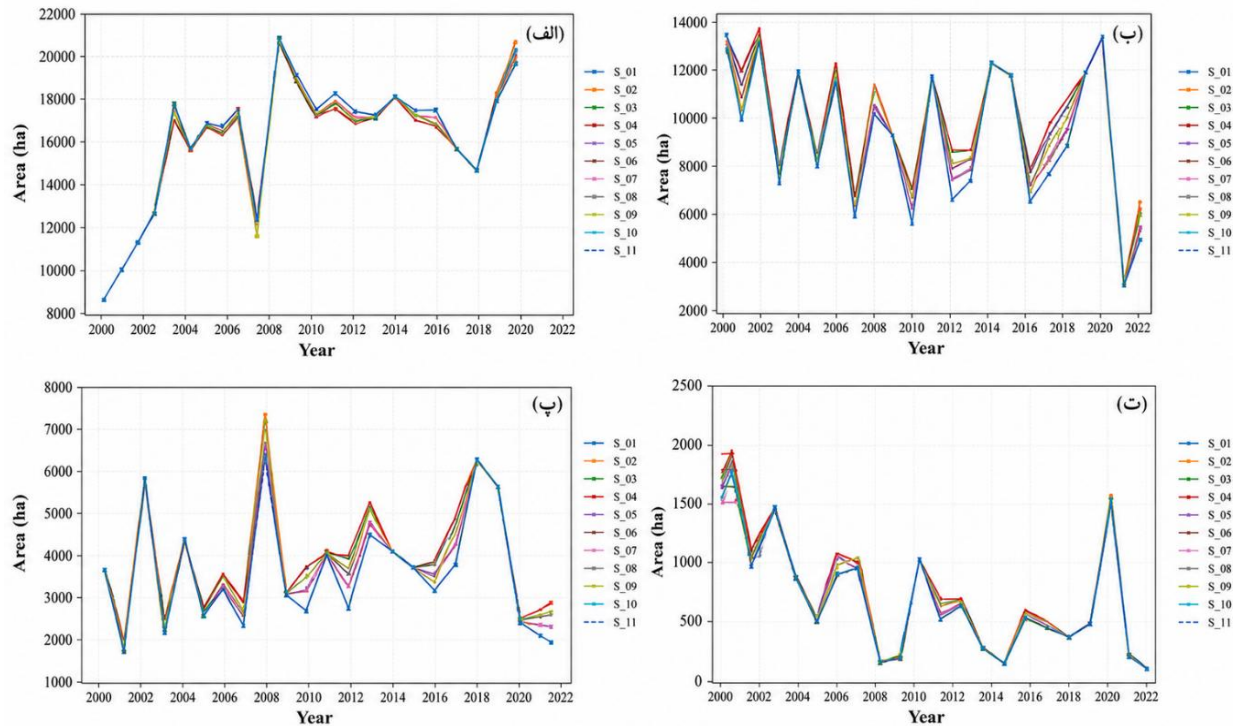
شکل ۴. میزان برداشت آب زیرزمینی در سناریوهای مدل ABM-AI

Fig 4. Groundwater extraction volume under groundwater management scenarios of the ABM-AI model

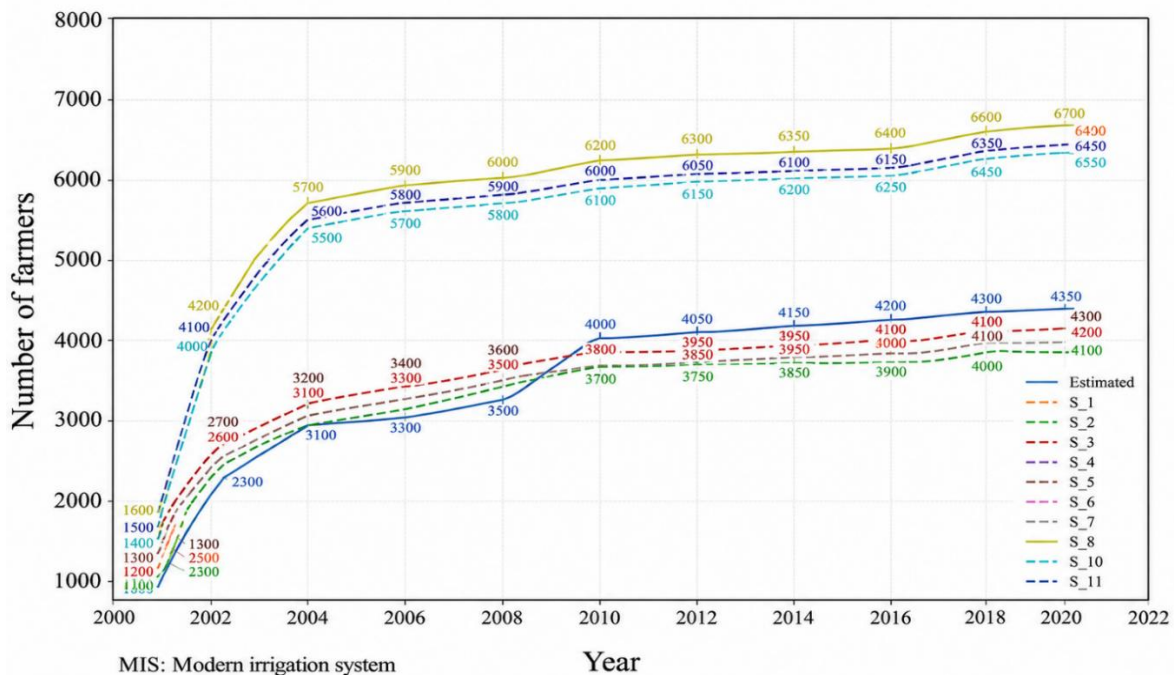


شکل ۵. تغییرات بیلان آب زیرزمینی پس از اعمال سناریوها در مدل ABM-AI

Fig 5. Changes in groundwater balance after applying groundwater management scenarios in the ABM-AI model



شکل ۶. مساحت زیر کشت محصولات کشاورزی (الف) گندم (ب) سیب زمینی (پ) یونجه و (ت) چغندر بر پایه ۱۱ سناریوی مدیریتی پیشنهادی
 Fig 6. Cultivated area of agricultural products: (a) wheat, (b) potato, (c) alfalfa, and (d) sugar beet under 11 proposed groundwater management scenarios



شکل ۷. تعداد کشاورزانی که بر پایه مدل ABM-AI، سامانه آبیاری نوین را انتخاب می کنند
 Fig 7. Number of farmers who choose modern irrigation systems based on the ABM-AI model under 11 groundwater management scenarios



شکل ۸. مقایسه‌ی مقدار (الف) میزان برداشت از چاه‌ها برای داده‌های مشاهداتی و سناریوی هشتم (ب) کسری بیلان در داده‌های مشاهداتی و سناریوی هشتم برای مدل ABM-AI

Fig 8. Comparison of (a) groundwater withdrawal volume for observed data and Scenario 8, and (b) groundwater balance deficit for observed data and Scenario 8 in the ABM-AI model

آمد. همچنین، پیش‌بینی وضعیت خشکسالی و ارائه آن به کشاورزان، نقش کلیدی در تغییر الگوی کشت و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی ایفا می‌کند. به‌گونه‌ای که در سال‌های با خشکسالی پیش‌بینی‌شده، تمایل کشاورزان به کشت محصولات کم‌آبر به طور معناداری افزایش یافته است. این امر ضرورت پایش مستمر و پیش‌بینی دقیق خشکسالی را به‌عنوان ابزاری کارآمد در سیاست‌های مدیریت منابع آب آشکار می‌سازد. از میان یازده سناریوی مدیریتی پیشنهادی، سناریوی هشتم به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب شد که منجر به کاهش میانگین ۸/۸ درصدی برداشت از چاه‌ها شد. با این حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی مانند در نظر نگرفتن تعاملات مستقیم سازمان‌ها به‌عنوان عامل‌های مستقل، اثر مستقیم همسایگی، همکاری و رقابت در فرایند تصمیم‌گیری روبه‌رو است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، رویکردی جدید با توسعه یک مدل عامل‌بنیان و کاربرد پیش‌بینی‌های خشکسالی به‌روزشده به‌منظور تخصیص آب زیرزمینی در بخش کشاورزی ارائه شد. در این رویکرد، رفتار عامل‌های کشاورزی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی شبیه‌سازی شد و در مدل ABM-AI به کار گرفته شد.

نتایج نشان‌دهنده عملکرد موفق این مدل در شبیه‌سازی تمایل کشاورزان به بهبود سامانه آبیاری و بهبود الگوی کشت با دقت به ترتیب، ۸۸ و ۹۴ درصد (بر پایه شاخص NSE) بود. همچنین، مدل توسعه‌یافته توانست تغییرات حجم آبخوان و برداشت از چاه‌ها را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند، به‌طوری که مقادیر شاخص NSE به ترتیب، ۰/۹۲ و ۰/۸۶ به دست

در این پژوهش، اثر تصمیمات این سازمان‌ها در قالب سناریوهایی مدیریتی دیده شد و تعاملات و تعارضات آنها و همچنین، نقش آنها به عنوان عامل‌های مستقل در مدل عامل‌بنیان در نظر گرفته نشد. همچنین، فرض شد یک چاه مستقل برای هر کشاورز وجود دارد، درحالی‌که در عمل، گاه چاه‌های اشتراکی فراوانی وجود دارند. همچنین، مدل بر پایه داده‌های دشت اردبیل توسعه و ارزیابی شده است؛ بنابراین، تعمیم مستقیم نتایج به دیگر آبخوان‌ها نیازمند کالیبراسیون مجدد مدل و استفاده از داده‌های محلی است.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده تعاملات اجتماعی میان کشاورزان و نیز نهادهای تصمیم‌گیرنده مانند شرکت آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی به عنوان عامل‌های مستقل در مدل وارد شوند. همچنین، موقعیت مکانی و فاصله از منابع آب به عنوان یک ویژگی مؤثر در تصمیم‌گیری لحاظ شود. همچنین، با توجه به این که شاخص SPI صرفاً بر پایه بارش است، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده از شاخص‌های جامع‌تر خشکسالی مانند SPEI یا PDSI که اثر دما و تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرند، برای افزایش دقت تحلیل‌های خشکسالی استفاده شود.

با مقایسه نتایج این پژوهش با دیگر پژوهش‌هایی که در دیگر دشت‌های ایران ارزیابی شده است، می‌توان به نکاتی درباره رویکرد پیشنهادی پی برد.

برای نمونه، مسائلی و احمدی (Masaeli & Ahmadi, 2024) با ترکیب سیاست‌های اقتصادی در دشت لنجانان به کاهش ۲۱/۵ درصدی مصرف آب و افزایش ۷۵ درصدی درآمد کشاورزان دست یافتند، درحالی‌که آقازاده و همکاران (Aghazadeh et al., 2024) بر برتری سیاست‌های ترکیبی بر سیاست‌های تک‌بعدی تأکید کردند. یافته‌های پژوهش حاضر نیز بیانگر آن است که ترکیب هم‌زمان چند سیاست مدیریتی، از جمله حمایت مالی از کشاورزان، اصلاح الگوی کشت و

توسعه سامانه‌های آبیاری نوین، عملکرد بهتری نسبت به اجرای یک سیاست منفرد دارد.

فرهادی و همکاران (Farhadi et al., 2016) با مدل عامل‌بنیان به کاهش حدود ۳/۵۸ درصدی برداشت از آبخوان دست یافتند، درحالی‌که پژوهش حاضر با مدل ترکیبی ABM-AI به کاهش ۰/۸ درصدی برداشت از چاه‌ها منجر شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر رویکرد تلفیقی پیشنهادی است. یافته‌های پژوهش حاضر در زمینه نقش عوامل روان‌شناختی در تصمیم‌گیری کشاورزان دشت اردبیل، با نتایج مطالعه‌ی رزاق‌زاده و همکاران (Razzaghzadeh et al., 2025) همخوانی دارد. بر پایه نتایج پژوهش آن‌ها که با استفاده از نظریه توسعه‌یافته رفتار برنامه‌ریزی‌شده در دشت اردبیل انجام شد، مدل توسعه‌یافته با افزودن متغیرهای اطلاع‌رسانی عمومی و تصور از میزان کنترل بر رفتار توانسته است قدرت پیش‌بینی قصد رفتاری را برای کشت محصولات کم‌آبر به میزان ۲۹/۵٪ (افزایش R^2 از ۰/۶۱ به ۰/۷۹) و برای پذیرش سامانه آبیاری نوین به میزان ۳۷/۵٪ (افزایش R^2 از ۰/۴۰ به ۰/۵۵) بهبود بخشد. همچنین، اطلاع‌رسانی عمومی با ضریب مسیر ۰/۶۵ قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌ی قصد کشت محصولات کم‌آبر تصور از میزان کنترل بر رفتار با ضریب مسیر ۰/۳۷ قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده قصد پذیرش سامانه آبیاری شناسایی شد.

در پژوهش حاضر، مدل ترکیبی ABM-AI با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی، توانست رفتار کشاورزان را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند؛ به‌طوری که شاخص NSE برای پیش‌بینی انتخاب سامانه آبیاری و الگوی کشت به ترتیب برابر با ۰/۹۰ و ۰/۹۴ به دست آمد که در مقایسه با ضریب تعیین R^2 مدل ETPB در پژوهش Razzaghzadeh et al. (حداکثر ۰/۷۹)، حدود ۱۹٪ عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. این برتری عددی ناشی از رویکرد داده‌محور و توانایی یادگیری ماشین در استخراج الگوهای

Apetrei, C. I., Strelkovskii, N., Khabarov, N., & Rincón, V. J. (2024). Improving the representation of smallholder farmers' adaptive behaviour in agent-based models: Learning-by-doing and social learning. *Ecological Modelling*, 489, 110609.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110609>.

Bahrami N, Nikoo MR, Al-Rawas G, Al-Jabri K, Gandomi AH. (2022). Optimal Treated Wastewater Allocation Among Stakeholders Based on an Agent-based Approach. *Water Resources Management*, 37(1), 135–56. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03359-y>.

Cong, R. G., & Cui, J. R. (2026). The role of farm size in public goods provision: An agent-based model of habitat conservation in agricultural landscapes. *Journal of Environmental Management*, 397, 128329. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128329>.

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>.

Darbandsari, P., Kerachian, R., & Malakpour-Estalaki, S. (2017). An Agent-based behavioral simulation model for residential water demand management: The case study of Tehran, Iran. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 78, 51–72. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.08.006>.

El Fartassi, I., Metcalfe, H., EL ALAMI, R., Diarra, A., Alonso-Chavez, V., Waine, T. W.,... & Corstanje, R. (2025). Adaptations in agricultural water management in arid regions: modelling farmer behaviour and cooperation on irrigation sustainability. Available at SSRN 4728533. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109789>.

Farhadi S, Nikoo MR, Rakhshandehroo GR, Akhbari M, Alizadeh MR. (2016). An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. *Agricultural Water Management*, 177, 348–58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.018>.

Farzaneh, M. R., Badreh, M., Najafi-Biragani, M., Paton, D., Hosseinpourtehrani, M., & Dokoohaki, H. (2023). Theoretical and empirical aspects of pro-environmental behaviors theory (PEBT). *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(2), 11–26. [In Persian].

<https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6026.1010>.

Frnda, J., Durica, M., Rozhon, J., Vojtekova, M.,

پیچیده‌ی رفتاری است. هر دو پژوهش بر نقش کلیدی PBC در پذیرش فناوری‌های نوین و تأثیر آگاه‌سازی بر تغییر الگوی کشت تأکید دارند؛ با این تفاوت که رویکرد ABM-AI امکان شبیه‌سازی پویای تصمیمات کشاورزان را در طول زمان و تحت سناریوهای مختلف مدیریتی فراهم می‌آورد و نقش آگاهی از چارچوب پیشنهادی ABM-AI به دلیل تلفیق قابلیت شبیه‌سازی تعاملات میان بهره‌برداران و منابع آب با توانایی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی رفتار کشاورزان، امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تر سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌کند. برخلاف مدل‌های مبتنی بر قوانین ثابت، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین سبب شد تصمیمات عامل‌ها بر پایه الگوهای استخراج‌شده از داده‌های واقعی اتخاذ شود و در نتیجه، رفتار کشاورزان با دقت بیشتری در فرایند شبیه‌سازی بازنمایی شود. این ویژگی، چارچوب پیشنهادی را به ابزاری مناسب برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تبدیل می‌کند.

منابع

- Ardabil Regional Water Company. (2015). Justification report for the extension and modification of the boundary of the Ardabil Plain restricted zone [In Persian]
- Aghazadeh, R., Shourian, M., & Javan Salehi, M. (2024). Assessment of the impact of socio-economic policies on groundwater consumption using a multi-agent-based modeling approach. *Water Policy*, 26(3), 290–308. <https://doi.org/10.2166/wp.2024.008>.
- Ajzen, I. (1985). From intentions to actions: A theory of planned behavior. In *Action control* (pp. 11–39). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69746-3_2.
- Ajzen, I. (2005). EBOOK: Attitudes, Personality and Behaviour. McGraw-Hill Education (UK).
- Akhbari, M., & Grigg, N. S. (2019). A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. *Water Resources Management*, 27(11), 4039–4052. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0394-0>.

- Nedoma, J., & Martinek, R. (2022). ECMWF short-term prediction accuracy improvement by deep learning. *Scientific Reports*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11936-9>
- Géron A. (2022). Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media, Inc.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383-3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>.
- Gupta, R., Bhattarai, R., & Mishra, A. (2019). Development of climate data bias corrector (CDBC) tool and its application over the agro-ecological zones of India. *Water*, 11(5), 1102. <https://doi.org/10.3390/w11051102>.
- Huang, Y., Long, H., Jiang, Y., Feng, D., Ma, Z., & Mumtaz, F. (2024). Motivating factors of farmers' adaptation behaviors to Climate change in China: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 359, 121105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121105>.
- Huber, R., Kreft, C., Späti, K., & Finger, R. (2024). Quantifying the importance of farmers' behavioral factors in ex-ante assessments of policies supporting sustainable farming practices. *Ecological Economics*, 224, 108303. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108303>.
- Kalthof, M. W., De Bruijn, J., De Moel, H., Kreibich, H., & Aerts, J. C. (2025). Adaptive behavior of farmers under consecutive droughts results in more vulnerable farmers: a large-scale agent-based modeling analysis in the Bhima basin, India. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(3), 1013-1035. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1013-2025>.
- Kreuzberger D, Kühl N, Hirschl S. (2023). Machine learning operations (MLOps): Overview, definition, and architecture. IEEE Access. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.02302>.
- Li, L., Jin, J., He, R., Kuang, F., Zhang, C., & Qiu, X. (2023). Effects of social capital on farmers' choices of Climate change adaptation behavior in Dazu District, China. *Climate and Development*, 15(2), 110-121. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2061403>.
- Liao C, Chen JL, Yen DC. (2007). Theory of planned behavior (TPB) and customer satisfaction in the continued use of e-service: An integrated model. *Computers in Human Behavior*, 23(6):2804–22. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2006.05.006>.
- Masaeli, Y., & Ahmadi, A. (2024). Assessing the suitability of groundwater resources based on farmers' predicted intentions and human–water feedbacks. *Journal of Hydrology*, 644, 132057. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2061403>.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183)*.
- Mirzaei, A., Azarm, H., Yazdanpanah, M., & Mardani Najafabadi, M. (2022). Socio-economic, social-capital, and psychological characteristics and Climate change adaptive behavior of farmers in Iran. *Climate Research*, 87, 1–12. <https://doi.org/10.3354/cr01683>.
- Nasiri, A. R., Kerachian, R., Shahangian, S. A., Kamali, F., & Dehjalali, A. N. (2026). Integrating agent-based modeling and environmental psychology to investigate agricultural land use change and prevent agroecosystem services degradation. *Journal of Environmental Management*, 397, 128367. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128367>.
- Plonsky O, Apel R, Ert E, Tennenholtz M, Bourgin D, Peterson JC, Reichman D, Griffiths TL, Russell SJ, Carter EC, Cavanagh JF. (2019). Predicting human decisions with behavioral theories and machine learning. arXiv preprint arXiv:1904.06866. <https://doi.org/10.1038/s41562-025-02267-6>.
- Razzaghzadeh, Z., Tabesh, M., Nasser, M., Masoumi, F., & Yazdanpanah, M. (2025). Beyond tradition: Unveiling the socio-psychological drivers of sustainable water use in farming. *Journal of Environmental Management*, 382, 125313. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125313>.
- Rezaeei, A. R., & Roshani, A. R. (2024). Prioritization of factors affecting drought using the fuzzy analytic hierarchy process method (Case study: Torbat Heydarieh city). *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 77-92. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7255.1057>.
- Ribeiro-Rodrigues, E., & Bortoleto, A. P. (2024). A systematic review of agent-based modeling and simulation applications for analyzing pro-environmental behaviors. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 343-362. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.04.017>.
- Rodríguez-Aguirre, E., Badillo-Márquez, A. E., Aguilar-Lasserre, A. A., & Flores-Asis, R. (2025). An

agent-based model to evaluate agricultural vulnerability and risk facing Climate change in strawberry production. *Crop Science*, 65(1), e21100.

<https://doi.org/10.1002/csc2.21100>.

Rossi, T. J. A., de Carvalho, A. M., & Sarti, F. M. (2026). Agent-Based Modeling of Urban Agriculture: Decision-Making, Policy Incentives, and Sustainability in Food Systems. *Complexities*, 2(1), 2. <https://doi.org/10.3390/complexities2010002>.

Russell S, Fielding K. (2010). Water demand management research: A psychological perspective. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR008408>.

Salimi, N., Mahjouri, N., Ferdosian, M. (2025). An Adaptive Agent-based Framework for Simulating Farmers' Behavior in the Face of Drought: Application of Numerical Weather Predictions. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04451-9>.

Schmidt, S. I., Picioreanu, C., Craenen, B., Mackay, R., Kreft, J. U., & Theodoropoulos, G. (2011). A multi-scale agent-based distributed simulation framework for groundwater pollution management. In 2011 IEEE/ACM 15th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (pp. 18-27). <https://doi.org/10.1109/DS-RT.2011.33>.

Shahpari, S., & Eversole, R. (2024). Planning to 'hear the farmer's voice': an agent-based modelling approach to agricultural land use planning. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 17(1), 115-138. <https://doi.org/10.1007/s12061-023-09538-7>.

Sousa, D., Alves, C., Vergara, F., Coelho, C., & Ralha, C. (2024). Agent-Based Modelling for representing water allocation methodologies in the irrigation system of the Formoso River Basin, Brazil. *Proceedings of IAHS*, 385, 71-77. <https://doi.org/10.5194/piahs-385-71-2024>.

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>.

Wu X, Whittington D. (2006). Incentive compatibility and conflict resolution in international river basins: A case study of the Nile basin. *Water Resources Research*, 42(2).

<https://doi.org/10.1029/2005WR004238>.

Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., Khayat, A., & Akhondi, Z. (2026). Simulation of Qanat Discharge in Balade Ferdows Using Machine Learning Algorithms under Drought Conditions. *Journal of Drought and Climate Change Research* (JDCR). Advance online publication. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2026.10872.1209>. [In Persian].

Yang, Y. C. E., Cai, X., & Stipanović, D. M. (2009). A decentralized optimization algorithm for multiagent system-based watershed management. *Water Resources Research*, 45(8). <https://doi.org/10.1029/2008WR007634>.

Yazdanpanah, M., Hayati, D., Hochrainer-Stigler, S., & Zamani, G. H. (2014). Understanding farmers' intention and behavior regarding water conservation in the Middle East and North Africa: A case study in Iran. *Journal of Environmental Management*, 135, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.016>.

Yuan, S., Li, X., & Du, E. (2021). Effects of farmers' behavioral characteristics on crop choices and responses to water management policies. *Agricultural Water Management*, 247, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106693>.

