Razi University

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Simulating groundwater level fluctuations using linear regression (SVR) and extreme learning (ELM) machine models

Safoura Pirouzmehr[1], **Mohammad Ali Izadbakhsh**[2]✉, **Saeid Shabanlou**[3], **Ahmad Rajabi**[4], and **Fariborz Yosefvand**[5]

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: s.pirouzmehr@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: ahmad.rajabi1974@gmail.com
5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: fariborzyosefvand@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 January 2025
Received in revised from 19 March 2025
Accepted 10 April 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
groundwater level,
support vector,
machine regression,
extreme learning,
machine model,
machine learning.

ABSTRACT

Objective: In this study, two advanced machine learning methods, namely support vector machine (SVR) and extreme learning machine (ELM), are investigated for the groundwater level simulation.

Method: The SVR model performs well due to its ability to simulate complex and nonlinear relationships and the use of kernel functions for accurate prediction. The ELM model, with its high computational speed and structural simplicity, is suitable for processing large and complex data. In this study, 10-year data including groundwater level, precipitation, evaporation and temperature with monthly time steps were used to develop these models. All variables were normalized to the range of 0 to 1 to prevent bias in the models And RMSE, NSE and R^2 indices were used to evaluate the performance of the models.

Results: The results showed that the ELM model with polynomial activation function provided the best performance in both training and testing stages (Training: RMSE=0.1747, NSE=0.9045, R^2=0.9097), (Test: RMSE=0.1675, NSE=0.9048, R^2=0.9098). In contrast, the SVR model with the multi-attack kernel function showed the best accuracy in both stages (Training: RMSE=0.2246, NSE=0.8740, R^2=0.9038), (Test: RMSE=0.2218, NSE=0.8758, R^2=0.9048).

Conclusions: The findings of this study indicate that the ELM model can be used as an effective tool in groundwater resources management. On the other hand, the poor performance of the SVR model with the linear kernel indicates its inefficiency in modeling nonlinear relationships in data from arid and semi-arid regions.

Cite this article: Pirouzmehr, S., Izadbakhsh, M.A., Shabanlou, S., Rajabi, A., & Yosefvand, F. (2025). Simulating groundwater level fluctuations using linear regression (SVR) and extreme learning (ELM) machine models, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(3), 1-19. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11658.1150

© The Author(s)
https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11658.1150

Publisher: Razi University.

Introduction

Groundwater level modeling in arid and semi-arid regions, such as the Bahar Plain, plays a crucial role in sustainable water resources management. Decreasing precipitation and increasing water demand in these regions have led to significant declines in groundwater levels, which have adverse effects on agriculture, drinking water supply, and natural ecosystems. In order to plan and manage water resources optimally, it is essential to use accurate and efficient forecasting models to analyze groundwater level variations

Method

MODFLOW numerical model

In this study, two advanced machine learning methods, namely support vector machine (SVR) and extreme learning machine (ELM), are investigated for the groundwater level simulation. The SVR model is effective in forecasting problems such as groundwater level changes due to its high ability to identify complex and nonlinear relationships between data. This model is able to discover hidden patterns in the data and provide accurate predictions by using the kernel functions. On the other hand, the ELM model is a suitable tool for processing large and complex data due to its high computational speed and structural simplicity. This model uses single-layer neural networks and is able to perform learning in a short time. One of the main challenges in using these models is the precise adjustment of parameters, which has a direct impact on their accuracy and efficiency. In this study, 10-year data including groundwater level, precipitation, evaporation, and temperature with a monthly time step are used to develop these models. All variables are normalized to a range of 0 to 1 to prevent bias in the models, and RMSE, NSE, and R^2 indices are used to evaluate the performance of the models.

Bahar Plain is located in the northwest of Hamedan Province, near the city of Bahar, and is considered one of the most important agricultural plains in this region. This vast plain plays a significant role in supplying the province's agricultural products due to its fertile soils and groundwater resources. The groundwater of this plain is considered the main source of water for agriculture, drinking water, and local industries, and this feature determines its high importance in the economic development and food security of the region. However, in recent years, due to excessive groundwater extraction, the water level of this plain has dropped sharply, causing problems such as reduced well yields and land subsidence. This plain is located in a semi-arid region with an average annual precipitation of between 300 and 350 mm, which occurs mainly in the form of winter and spring rainfall. This amount of precipitation is not enough to provide surface water and recharge the groundwater aquifers of this plain, and due to climate change and the decrease in precipitation in recent years, the amount of inflow to groundwater resources has decreased significantly. This decrease has turned the Hamedan Bahar Plain into a water crisis area, and this has increased the need for water resource management, especially in the agricultural sector, and its optimal use.

Results

The results indicate that the ELM model with polynomial activation function provided the best performance in both training and testing stages. In contrast, the SVR model with linear kernel shows the lowest accuracy in both stages. The findings of this study indicate that the ELM model with polynomial activation function, due to its high ability in fast learning and processing complex data, has a significant performance in simulating groundwater level changes and can be used as an effective tool in groundwater resources management. On the other hand, the poor performance of the SVR model with linear kernel indicates its inefficiency in modeling nonlinear relationships in data from arid and semi-arid regions.

Conclusions

This research showed the importance of the selection of an appropriate model and optimal adjustment of parameters in improving the accuracy of predictions and help managers make decisions for sustainable operation of groundwater resources. In addition, the findings of this study proved that the selection of a suitable machine learning and its parameters for predicting the groundwater level in complex hydrological mediums is very important.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors .

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct .

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین رگرسیون خطی (SVR) و یادگیری افراطی (ELM)

صفورا پیروزمهر[۱]، محمدعلی ایزدبخش[۲] ✉، سعید شعبانلو[۳]، احمد رجبی[۴]، و فریبرز یوسفوند[۵]

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه:s.pirouzmehr@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com
۳. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com
۴. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه:ahmad.rajabi1974@gmail.com
۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ahmad.rajabi1974@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
سطح آب زیرزمینی،
رگرسیون با ماشین بردار پشتیبان،
مدل ماشین یادگیری افراطی،
یادگیری ماشین.

چکیده

هدف: هدف از این مطالعه مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند دشت بهار، برای مدیریت پایدار منابع آبی با استفاده از دو مدل یادگیری ماشین پیشرفته، یعنی ماشین بردار پشتیبان (SVR) و ماشین یادگیری شدید (ELM) است.

روش پژوهش: در این مطالعه، داده‌های ۱۰ساله شامل سطح آب زیرزمینی، بارندگی، تبخیر و دما با گام زمانی ماهانه برای توسعه این مدل‌ها استفاده شد. تمامی متغیرها برای جلوگیری از بایاس شدن مدل‌ها به بازه ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند و شاخص‌های RMSE، NSE و R^2 برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار گرفته شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل ELM با تابع فعال‌ساز چندجمله‌ای در هر دو مرحله آموزش و آزمون بهترین عملکرد را ارائه داده است (آموزش: $R^2 = 0.9097$, NSE = 0.9045 , RMSE = 0.1747)، (تست: $R^2 = 0.9098$, NSE = 0.9048 , RMSE = 0.1675) . در مقابل، مدل SVR با کرنل چندحمله ایی بهترین دقت را در هر دو مرحله نشان داد(آموزش: $R^2 = 0.9038$, NSE = 0.8740 , RMSE = 0.2246)، (تست: $R^2 = 0.9048$, NSE = 0.8758 , RMSE = 0.2218)

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که مدل ELM می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب زیرزمینی استفاده شود. از سوی دیگر، عملکرد ضعیف مدل SVR با کرنل خطی حاکی از عدم کارایی آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی در داده‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

استناد: پیروزمهر، صفورا؛ ایزدبخش، محمدعلی؛ شعبانلو، سعید؛ رجلی، احمد؛ و یوسفوند، فریبرز. (۱۴۰۴). شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین رگرسیون خطی (SVR) و یادگیری افراطی (ELM). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۳)، ۱۹-۱.
https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11658.1150

شر: دانشگاه رازی. © نویسندگان

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین، نقش اساسی در تأمین نیازهای آبی انسان‌ها، کشاورزی و صنعت ایفا می‌کنند (نوروزی خطیری و همکاران [1] ، ۲۰۲۳).

شبیه‌سازی و مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب است. با افزایش نیاز به منابع آبی در سراسر جهان، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک، اهمیت شبیه‌سازی دقیق رفتار منابع آب زیرزمینی بیشتر از گذشته احساس می‌شود. این مدل‌ها به ما این امکان را می‌دهند که رفتار منابع آب زیرزمینی را تحت‌تأثیر عوامل مختلف از جمله برداشت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی، و دیگر فعالیت‌های زیست‌محیطی پیش‌بینی کنیم. ازاین‌رو، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری جهت ارزیابی تأثیرات ناشی از مدیریت‌های مختلف، نقش مهمی در سیاست‌گذاری‌های مرتبط با آب ایفا می‌کند. شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی همچنین به ما در درک بهتر فرایندهای پیچیده هیدروژئولوژی کمک می‌کند (مزرعه و همکاران، ۲۰۲۳). مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از داده‌های فیزیکی و شیمیایی منطقه می‌تواند جریان‌های آب زیرزمینی، انتقال آلودگی‌ها، و تأثیر تغییرات سطح زمین بر منابع آبی را به دقت شبیه‌سازی کند. این قابلیت، به‌ویژه در مناطقی که به شدت از منابع آب زیرزمینی برای تأمین آب شرب و کشاورزی استفاده می‌شود، اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا به کمک آن می‌توان با دقت بیشتری اثرات استخراج بیش از حد و تغییرات کاربری زمین را پیش‌بینی و کنترل کرد. مدل‌سازی و شبیه‌سازی آب زیرزمینی به طور مؤثر می‌تواند در پیش‌بینی بحران‌های زیست‌محیطی، از جمله خشکسالی‌ها و کاهش منابع آبی، نقشی اساسی ایفا کند (کینزل باچ و همکاران [2] ، ۲۰۰۳). این مدل‌ها امکان ارزیابی و شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی، مانند کاهش بارش و افزایش دما، بر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند. به همین دلیل، مدل‌های شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت بحران‌های آبی شناخته می‌شوند. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های دقیق به مدیران و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا از استخراج بیش از حد منابع آب زیرزمینی جلوگیری کرده و برنامه‌های پایداری برای استفاده بهینه از این منابع تدوین کنند (جاکمن و همکاران [3] ، ۲۰۱۶). در نهایت، استفاده از مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی می‌تواند به بهبود فرآیند تصمیم‌گیری در سطوح مختلف کمک کند. این مدل‌ها با ارائه داده‌های دقیق و قابل اطمینان درباره منابع آبی و روند تغییرات آنها، اطلاعات ارزشمندی را برای مدیریت بهینه منابع آب در اختیار می‌گذارند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی نه تنها ابزار قدرتمندی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت است، بلکه به‌عنوان روشی مؤثر برای جلوگیری از مشکلات محیطی نظیر نشست زمین، شور شدن آب و کاهش کیفیت منابع آبی مطرح می‌شود (تانگ و همکاران [4] ، ۲۰۲۲). بنابراین، اهمیت شبیه‌سازی و مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی نه تنها در مدیریت منابع موجود بلکه در حفظ آنها برای نسل‌های آینده حیاتی است

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و کارآمد در مدیریت منابع آبی مطرح شده است. مدل‌های یادگیری ماشین، باقدرت پردازش بالای خود در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی، این امکان را فراهم می‌کنند که الگوهای پنهان و روابط پیچیده بین متغیرهای محیطی و سطح آب زیرزمینی شناسایی شوند. این روش‌ها به‌ویژه زمانی اهمیت پیدا می‌کنند که داده‌های موجود ناکافی یا پراکنده باشند، و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر مدل‌های سنتی قادر به پاسخگویی به نیازهای پیچیده مدیریتی نباشند (تائو و همکاران [5] ، ۲۰۲۲). به همین دلیل تاکنون مطالعات فراوانی در این زمینه انجام شده است.

1. Norouzi Khatiri et al
2. Kinzelbach et al
3. Jakeman et al
4. Tang et al
5. Tao et al

گائور و همکاران [1] (۲۰۲۱) به بررسی تکنیک‌های بهینه‌سازی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر موجک (WA-SVR) برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مدل‌های ANN به دلیل توانایی در شبیه‌سازی روابط غیرخطی میان داده‌های ورودی و خروجی، بدون نیاز به درک کامل فرایندهای فیزیکی، قادرند پیش‌بینی دقیقی از سطح آب زیرزمینی ارائه دهند. در این تحقیق، عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی (R^2) و شاخص کارایی نش – ساتکلیف (Ef) ارزیابی شد. یافته‌های مطالعه نشان داد که استفاده از معماری‌های مختلف شبکه و الگوریتم‌های آموزشی، از جمله الگوریتم لونبرگ – مارکوارت (LM)، می‌تولند کارایی مدل ANN را بهبود بخشد. علاوه بر این، مدل WA-SVR مبتنی بر تجزیه موجک دقت بالاتری نسبت به مدل ANN در شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی نشان داد.

ملک‌زاده و همکاران [2] (۲۰۱۹) به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی منطقه کبودرآهنک همدان با استفاده از مدل‌های مادفلو، ELMو WA-ELM پرداختند. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای این مدل‌ها در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بود، به‌طوری که ضریب همبستگی مدل مادفلو ۰.۹۱۷ و شاخص پراکندگی ۰.۰۰۰۴ محاسبه شد. در ادامه، ۱۰ مدل مختلف برای ELM وWA-ELMبا ترکیب‌های ورودی و گام‌های زمانی مختلف ارزیابی شدند. بهترین دقت در مدل ELM با تابع فعال‌سازی sigmoid و در مدل WA-ELM با خانواده ویولت Daubechies2 به‌دست آمد. مدل WA-ELM با ضریب همبستگی ۰.۹۵۹ و ضریب نش ۰.۹۱۵، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی داشت و به‌عنوان مدل برتر شناخته شد. این مطالعه نشان‌دهنده برتری مدل‌های ترکیبی در شبیه‌سازی مسائل پیچیده منابع آب است.

میرابی و همکاران [3] ، (۲۰۱۹) در این مطالعه به ارزیابی عملکرد مدل‌های داده‌محور، شامل SVR، ANNبرای پیش‌بینی سطح آب در آبخوان‌های محصور و غیرمحصور پردازد. در این مطالعه، از ترکیب آزمون هیبریدی گاما(GT) و الگوریتم ژنتیک (GA) برای تعیین بهترین ورودی‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های SVR و ANN برای پیش‌بینی یک‌ماهه نسبت به پیش‌بینی‌های طولانی‌تر (دو و سه ماهه) دقت بیشتری داشتند و مدل SVR عملکرد بهتری نسبت به مدل ANN در پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی تا سه ماه آینده داشت.

روشنی و همکاران [4] (۲۰۲۲) عملکرد مدل‌های SVR و ترکیب آن با الگوریتم ابتکاری AIG را در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی ماهانه دشت شبستر از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ ارزیابی کردند. در این مطالعه، از ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای تست مدل‌ها استفاده شد و کارایی مدل‌ها با شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی، کارایی نش–ساتکلیف، خطای ریشه میانگین مربعات(RMSE) ، نسبت انحراف معیار و شاخص لگیتز و مک‌کیب مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی SVR-AIG بهترین عملکرد را در هر دو مرحله آموزش و آزمون به‌دست آورد.

مزرعه و همکاران[5] (۲۰۲۴) در این پژوهش به شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان میقان با استفاده از مدل‌های MODFLOW و GMDH پرداختند و آن‌ها را در قالب مدل ترکیبی جدید ریاضی–یادگیری ماشینی (MMWEM)ترکیب کردند. داده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه برای دوره ۲۰۱۳–۲۰۲۳ استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل GOA-GMDH عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های دیگر داشته و مدل ترکیبی (MMWEM) دقت بالاتری در پیش‌بینی نسبت به مدل‌های جداگانه داشت.

شهبازی و همکاران [6] (۲۰۲۳) در این پژوهش از مدل‌های SVR و ANN برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی استفاده کردند و سپس ابزارهای پیش‌پردازش تبدیل موجک (WT) و تجزیه تجربی مود مکمل (CEEMD) را به این مدل‌ها اضافه کردند. چهار مدل ترکیبی شاملW-ANN ، W-SVR، CEEMD-ANNو CEEMD-SVR توسعه یافت و عملکرد

1. Gaur et al
2. Malekzadeh et al
3. Mirabi et al
4. Roshni et al
5. Mazraeh et al
6. Shahbazi et al

آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل ANN نسبت به SVR دقت بالاتری دارد و استفاده از ابزارهای پیش‌پردازش موجب بهبود دقت پیش‌بینی‌ها می‌شود.

از دیگر تحقیقات در زمینه موضـــوع این تحقیق می‌توان به تحقیقات عزیزی و همکاران [1] (۲۰۲۳)؛ امیری و همکاران [2] (۲۰۲۱)؛ شعبانلو[3] (۲۰۱۸)؛ اسماعیلی و همکاران [4] (۲۰۲۱)؛ فلاحی و همکاران [5] (۲۰۲۳)؛ پناهی و همکاران [6] (۲۰۲۲)؛ جلیلیان و همکاران [7] (۲۰۲۲)؛ امان جلیلی و همکاران [8] (۲۰۲۳)؛ قریب و همکاران [9] (۲۰۲۰)؛ مقدم و همکاران [10] (۲۰۲۲)؛ و محمد و همکاران [11] (۲۰۲۳۲) اشاره کرد.

روش پژوهش

دشت بهار در شمال غربی استان همدان و در نزدیکی شهر بهار واقع شده است. این دشت با مساحتی گسترده، به دلیل برخورداری از خاک‌های حاصلخیز و منابع آبی زیرزمینی، نقش قابل‌توجهی در تأمین محصولات کشاورزی استاندارد دارد (قبادی و همکاران [12] ، ۲۰۲۰). این دشت در یک منطقه نیمه‌خشک با بارش سالانه متوسطی بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر واقع شده است که عمدتاً به صورت بارش‌های زمستانی و بهاری رخ می‌دهد (افروزی و همکاران [13] ، ۲۰۲۱).. این میزان بارش برای تأمین آب سطحی و تغذیه سفره‌های زیرزمینی این دشت کافی نیست، و با توجه به تغییرات اقلیمی و کاهش بارش‌ها در سال‌های اخیر، میزان ورودی به منابع آبی زیرزمینی کاهش چشمگیری داشته است. این کاهش باعث شده که دشت بهار همدان به یک منطقه دارای بحران آبی تبدیل شود و این مسئله نیاز به مدیریت منابع آب به‌خصوص در حوزه کشاورزی و مصرف بهینه آن را افزایش داده است (بلالی و کاسبین[14]، ۲۰۲۲). با توجه به اهمیت این دشت در تولیدات کشاورزی و تأمین آب منطقه، نیاز به اجرای طرح‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و ارتقای آگاهی‌های زیست‌محیطی میان کشاورزان و بهره‌برداران امری ضروری به نظر می‌رسد تا ضمن کاهش مصرف آب، از آلودگی منابع آبی نیز جلوگیری شود (رفیعی مهر و کالجی[15]، ۲۰۲۱).

برای توسعه این مدل‌ها از اطلاعات ماهانه سطح آب زیرزمینی، بارندگی، تبخیر و دما برای یک دوره ۱۸ساله (۱۳۸۲ الی ۱۴۰۰) استفاده شد. با توجه به متفاوت بودن مقیاس این اطلاعات، برای جلوگیری از بایاس شدن مدل همه داد های مورد استفاده در بازه صفر و یک نرمال شدند. همچنین رای توسعه همه مدل ها از ۸۰ درصد همه داده ها برای آموزش و از سایر داده ها برای تست مدل ها استفاده شد. بعد از آماده شده داده ها از نرم افزار MATLAB ورژن r2019a برای توسعه مدل ها استفاده شد.

۱. شبکه عصبی رگرسیون ماشین بردار پشتیبان[16] (SVR)

SVR نسخه‌ای از مدل ماشین بردار پشتیبان[17] (SVM) است که برای مسائل رگرسیونی طراحی شده است. هدف اصلیSVR ، پیش‌بینی مقادیر پیوسته به‌جای طبقه‌بندی داده‌هاست، این مدل تلاش می‌کند تا با استفاده از یک تابع هسته، فاصله‌ی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده را در حدود یک مقدار خطا حداقل کند (احمد و همکاران [18] ، ۲۰۲۳). یکی از ویژگی‌های کلیدیSVR ،

1. Azizi et al
2. Amiri et al
3. Shabanlou
4. Esmaeili et al
5. Fallahi et al
6. Panahi et al
7. Jalilian et al
8. Aman Jalili et al
9. Gharib et al
10. Moghadam et al
11. Mohammed et al
12. Ghobadi et al
13. Afruzi et al
14. Balali & Kasbian
15. Rafiemehr & Kaleji
16. Support Vector Regression (SVR)
17. Support Vector Machine (SVM)
18. Ahmed et al

توانایی آن در کنترل حاشیه خطا و افزایش دقت مدل است که با تنظیم پارامترهای "C" و "epsilon" امکان‌پذیر است. پارامتر Cبه‌عنوان یک ضریب جریمه عمل کرده و کمک می‌کند تا مدل از پیچیدگی بیش از حد جلوگیری کند و همزمان دقت بالاتری ارائه دهد .عملکرد SVR وابستگی زیادی به انتخاب تابع هسته مناسب دارد (بالوگون و همکاران [1] ، ۲۰۲۱). تابع هسته تعیین می‌کند که چگونه داده‌های ورودی به فضای ویژگی‌ها نگاشت می‌شوند و ساختارهای غیرخطی در داده‌ها به‌درستی مدل‌سازی می‌شوند (ژانگ و اودوونل[2]، ۲۰۲۰). انتخاب مناسب هسته و پارامترهای SVR نه‌تنها بر دقت پیش‌بینی تأثیرگذار است، بلکه بر زمان محاسباتی و عملکرد کلی مدل نیز اثر می‌گذارد .بااین‌حال، یکی از چالش‌های SVR، نیاز به تنظیم دقیق پارامترهای آن است که می‌تواند هزینه محاسباتی بالایی را به همراه داشته باشد، به‌ویژه در صورت استفاده از جستجوی شبکه برای یافتن بهترین پارامترها. باوجود این، SVR در بسیاری از حوزه‌ها مانند پیش‌بینی سری‌های زمانی، تخمین قیمت و سیستم‌های توصیه‌گر به دلیل دقت بالا و توانایی تعمیم خوب در مواجهه با داده‌های نویزی محبوب است، این ویژگی‌ها باعث شده SVR به طور گسترده‌ای در مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب استفاده شود (پناهی و همکاران [3] ، ۲۰۲۰). اگر N تعداد نمونه باشد به‌طوری‌که $\{x_k,y_k\}_{k=1}^{N}, x \in R^m, y \in R$ در این حالت معادله استفاده شده توسط مدل SVR را میتوان به صورت زیر نوشت (اسمولا و اسچولکوف[4]، ۲۰۰۴).

$$f(x)=w.\ \emptyset(x)+b \qquad (۱)$$

که در آن x بردار متغیرهای ورودی است، w بردار وزن‌ها است، b بردار بایاس است، Ø نوعی تابع غیرخطی برای تبدیل‌کردن متغیرهای ورودی به فضای جدید با ابعاد بالاتر است. با درنظرگرفتن فرضیات مختلف می‌توان نوعی مسئله بهینه‌سازی محدب را برای حل این معادله و محاسبه مقدار بهینه وزن‌ها معرفی کرد.

$$\min_{w,b,\xi_i,\xi_j^*} \ \frac{1}{2}\|w\|^2+C\sum_{i=1}^{m}(\xi_i+\xi_i^*) \qquad (۲)$$

$$S.\ t.\ \begin{pmatrix} w\ .\ \emptyset(x_i)+b-y_i \le \varepsilon+\xi_i \\ y_i-w\ .\ \emptyset(x_i)-b \le \varepsilon+\xi_i^* \\ \xi_i,\xi_i^* \ge 0; i=1,2,3\ldots m \end{pmatrix}$$

که در آن ξ_i, ξ_j^* متغیر کمکی[5] هستند، C یک عدد مثبت با مقدار مشخص برای جلوگیری بیش برازش مدل است.در نهایت این مسئله بهینه سازی را میتوان با استفاده تئوری دوگانه[6] و با درنظر گرفتن ضریب لاگرانژ و محدودیت های بهینه حل کرد، بر این اساس رابطه (۲) را میتوان به صورت زیر نوشت.

$$f(x, \beta_i, \beta_i^*)= \sum_{i=1}^{n}(\beta_i-\beta_i^*)k(x_i,x_j)+b \qquad (۳)$$

که در آن $k(x_i,x_j)$ تابع کرنل است که برابر است با $\emptyset(x_i)\emptyset(x_j)$. توابع کرنل از مهم تین بخش های مدل SVR است، به همین دلیل همواره تلاش می شود از توابع مناسبی برای این کار استفاده شود، در این مطالعه از تابع خطی، سیگموید، RBF و چند جمله ایی استفاده شد. هر یکی از این توابع پارامترهایی دارند که تعیین مقدار دقیق ان ها تاثیر چشمگیری در دقت مدل SVM دارد، به هین دلیل همیشه سعی میشود از روش های دقیقی برای تعیین مقدار این پارامترها استفاده کرد.

1. Balogun et al
2. Zhang & O'Donnell
3. Panahi et al
4. Smola & Schölkopf
5. Slack variables
6. Duality Theory

۲. ماشین یادگیری افراطی (ELM)[1]

ELM یک نوع شبکه عصبی تک‌لایه‌ای پیش‌خور است که به دلیل سرعت بالا و سادگی ساختار در سال‌های اخیر موردتوجه قرار گرفته‌اند. برخلاف شبکه‌های عصبی سنتی که وزن‌های لایه‌های پنهان خود را از طریق فرایندهای محاسباتی پیچیده تنظیم می‌کنند، در مدل ELM وزن‌های لایه پنهان به‌صورت تصادفی تعیین می‌شوند و تنها وزن‌های لایه خروجی از طریق روش‌های ساده و تحلیلی بهینه می‌شوند. این ویژگی منجر به کاهش چشمگیر زمان محاسباتی در مراحل یادگیری می‌شود و ELM را به مدلی سریع و کارآمد تبدیل می‌کند که می‌تواند برای مسائل بلادرنگ و سیستم‌هایی با محدودیت منابع مناسب باشد (کومار و همکاران، [2] ۲۰۲۰).

ELM توانایی پردازش داده‌های غیرخطی را دارد و این کار را با استفاده از توابع فعال‌سازی غیرخطی در لایه پنهان انجام می‌دهد. توابع فعال‌سازی رایج در ELM مانند linear, sigmoid, RBF and Polynomial، به مدل کمک می‌کنند تا داده‌های پیچیده و با الگوهای غیرخطی را بادقت قابل‌قبولی پردازش کند. ازآنجاکه نیازی به تنظیم وزن‌های لایه‌های پنهان نیست، این مدل‌ها از پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به مدل‌های یادگیری عمیق یا شبکه‌های عصبی چندلایه برخوردارند، و همین امر آن‌ها را برای کاربردهایی که سرعت پردازش و کارایی اهمیت دارند، مناسب می‌کند (لی و همکاران [3]، ۲۰۲۰).

یکی از مزایای دیگر مدل ELM قابلیت تعمیم‌پذیری بالای آن است. به دلیل عدم نیاز به تنظیم پارامترهای داخلی، این مدل بر روی داده‌های آزمایشی عملکرد خوبی دارد و از مشکلاتی مانند بیش برازش که در شبکه‌های عصبی پیچیده‌تر مشاهده می‌شود، کمتر رنج می‌برد، ازاین‌رو، ELM در مدیریت منابع آب محبوبیت زیادی یافته است (علی امیر و همکاران [4]، ۲۰۲۳).

بااین‌حال، ELM نیز با چالش‌هایی مواجه است. ازآنجایی‌که وزن‌های لایه‌های پنهان به‌صورت تصادفی تنظیم می‌شوند، ممکن است مدل در برخی موارد به نتایج ناپایدار برسد، و به همین دلیل عملکرد آن بسته به داده‌های ورودی و توزیع تصادفی اولیه وزن‌ها ممکن است متفاوت باشد. برای مقابله با این مسئله، برخی از تحقیقات پیشنهاد بهبودهایی مانند انتخاب استراتژیک وزن‌های اولیه یا ترکیب ELM با دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی را ارائه داده‌اند (عزیزپور و همکاران [5]، ۲۰۲۱). بااین‌حال، به دلیل مزایای بسیار ELMها در سرعت و سادگی، همچنان یکی از مدل‌های پرطرف‌دار در حوزه یادگیری ماشین به شمار می‌روند و به طور گسترده در مسائل کاربردی و پژوهشی مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای N نمونه یادگیری مختلف اگر یک دیتاست شامل N نمونه آموزش متمایز باشد (x_i,t_i) به طوری که $x_i \in R^n$ متغیر ورودی و $t_i \in R^n$ متغیر خروجی مدل باشد. با استفاده از L گره پنهان و یک تابع فعال ساز(G) میتوان یک مدل ELM را توسعه داد (هووانگ و همکاران [6]، ۲۰۰۶).

$$t_j=\sum_{i=1}^{N}\beta_i.G(a_i.x_j+b_i) \quad j=1,2,3\ldots N \qquad (۴)$$

که در آن $a_i=[a_{i1},a_{i2},a_{i3}\ldots a_{in}]^T$ بردار ضرایب وزنی بین گره ورودی و گره پنهان i ام است و $\beta_i=[\beta_{i1},\beta_{i2},\beta_{i3}\ldots\beta_{im}]^T$ بردار ضرایب وزنی بین گره پنهان iام و گره های خروجی است. b_i ضریب بایاس گره پنهان iام است.$G(a_ix_j+b_i)$ خروجی گره پنهان iام با توجه به ورودی های x_j است.

رابطه بالا را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد

$$H\beta=T \qquad (۵)$$

1. Extreme learning machine
2. Kumar et al
3. Li et al
4. Alizamir et al
5. Azizpour et al
6. Huang et al

$$Y = \begin{bmatrix} y_1^T \\ \vdots \\ y_N^T \end{bmatrix}_{N\times m} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix}_{\tilde{N}\times m}$$

$$H(w_1 \ldots w_N, b_1 \ldots B_N, x_1 \ldots x_N) = \begin{bmatrix} G(a_1.x_1+b_1) & \cdots & G(a_N.x_1+b_N) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ G(a_1.x_N+b_1) & \cdots & G(a_N.x_N+b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N\times N}$$

اگر تعداد نورون‌های مخفی با تعداد داده‌هایی که برای آموزش استفاده می‌شود برابر باشد، $(N = N)$ ماتریس H مربعی و معکوس‌پذیر می‌شود، در این صورت SLFN می‌تواند نمونه‌ای آموزش را با خطای صفر تخمین زند. اما در بیشتر موارد تعداد نورون‌های مخفی بسیار کوچک‌تر از تعداد داده‌ها برای آموزش است $(N << N)$ در این حالت ماتریس H غیرمربعی خواهد شد که در آن پارامترهایw_i, b_i, β_i (i=1,2,3…N) وجود ندارند به طوریکه در رابطه $H\beta=T$ صدق کنند. به همین دلیل در این شرایط پارامترهایw_i, b_i, β_i (i=1,2,3…N) را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (هووانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

$$\|H(a_1,\ldots a_N,b_1,\ldots b_N)\beta-T\| = \min_{w_i,b_i,\beta}\|H(a_1,\ldots a_L,b_1,\ldots b_L)\beta-T\| \qquad (۶)$$

که در آن H ماتریس خروجی لایه پنهان مدل ELM است، β ماتریس وزن‌های خروجی است $[\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3} \ldots \beta_{in}]^T$، T ماتریس نمونه های شبیه سازی شده است $[t_{i1}, t_{i2}, t_{i3} \ldots t_{in}]^T$. رابطه بالا معادل است با حداقل کردن تابع هزینه زیر:

$$E = \sum_{j=1}^{N}\left(\sum_{j=1}^{N}\beta_i g(w_i.x_j + b_i) - t_j\right)^2 \qquad (۷)$$

در نهایت مقدار β را می‌توان عملیات ساده معکوس تعمیم‌یافته از ماتریس خروجی لایه پنهان محاسبه کرد.

$$\beta^* = H^{\dagger}T \qquad (۸)$$

که در آن $H^{\dagger}$ تعمیم معکوس مون-پنروز از ماتریس خروجی لایه پنهان است، و می‌توان آن را با استفاده از روش های مختلفی مانند singular value decomposition(SVD) محاسبه کرد.

۳. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌ها

در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های خطای میانگین مربعات ریشه‌ای (RMSE)، شاخص کارایی نش – سوتکلیف (NSE)، ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. شاخص R^2یک معیار آماری است که میزان تناسب مدل با داده‌های واقعی را اندازه‌گیری می‌کند. به عبارت دیگر، R^2 نشان‌دهنده درصد تغییرات داده‌های واقعی است که مدل قادر به پیش‌بینی آن‌ها می‌باشد. شاخص NSE برای ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی در زمینه‌های هیدرولوژی و دیگر حوزه‌ها به کار می‌رود. این شاخص مقایسه‌ای بین خطای مدل و واریانس داده‌های واقعی است و نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی تغییرات داده‌ها می‌باشد. شاخص RMSE یک معیار متداول برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیونی است. این شاخص میزان خطای مدل را با مقایسه پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی اندازه‌گیری می‌کند.

(روابط (۹) الی (۱۱))

$$RMSE = \left[N^{-1}\sum_{I=1}^{N}(y_i - O_i)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۹)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2} \qquad (۱۰)$$

$$R^2=\left[\sum_{i=1}^{N}(F_i-\bar{y})(O_i-\bar{O})\right]^2\left[\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2(O_i-\bar{O})^2\right]^{-1} \quad (۱۱)$$

دراین‌رابطه N تعداد مشاهده‌ها است، y_i مقدار پشیبینی شده ست،O_iمقدار مشاهده ای است و $\bar{y}$ و$\bar{O}$ به ترتیب متوسط مقادیر O_i و y_i هستند.

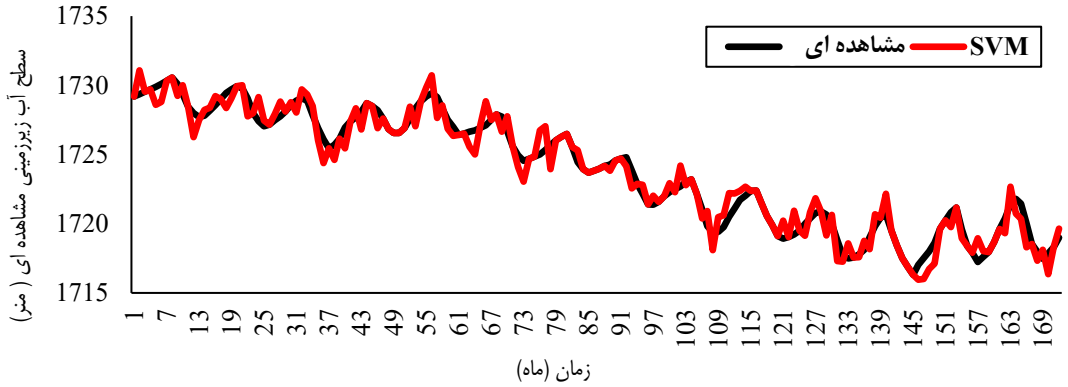
یافته‌های پژوهش

ابتدا مدل SVM توسعه داده شد و عملکرد آن با استفاده از توابع کرنل مختلف ارزیابی شد. برای انتخاب بهترین متغیرهای ورودی به مدل در این مطالعه از روش آزمون‌وخطا استفاده شد. بر این اساساً بعد از چندین بار اجرای مدل با توابع فعال‌ساز مختلف و ارزیابی نتایج آن‌ها مشخص شد که این مدل با سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t-1, t-2 و بارندگی در گام زمانی t بهترین عملکرد را دارد. بر اساس نتایج حاصل مدل SVR با تابع کرنل چندجمله‌ای بهترین عملکرد را دارد، به‌طوری‌که مقدار شاخص‌های RMSE, NSE , R^2 این مدل در مرحله آموزش به ترتیب برابر ۰/۹۰۳۸، ۰/۸۷۴۰ و ۰/۲۲۴۶ است در حالی که مقدار انی شاخص ها برای مرحله تست ببه ترتیب برابر ۰/۹۰۴۸، ۰/۸۷۵۸ و ۰/۲۲۱۸ است.در این حالت مقدار پارامترهای C, d, γ,ε به ترتیب برابر ۳/۷۶۱، ۴، ۰/۲۵۴ و ۰/۰۰۲ است. همچنین این مدل با تابع کرنل خطی بدترین عملکرد را دارد به طوری که مقدار شاخص های RMSE, MAE , R^2این مدل در مرحله آموزش به ترتیب برابر ۰/۸۹۶۵، ۰/۸۴۱۳ و ۰/۲۵۴۵ است در حالی که مقدار این شاخص ها برای مرحله تست به ترتیب برابر ۰/۸۹۷۱، ۰/۸۴۳۳ و ۰/۲۴۹۷ است. در این حالت مقدار پارامترهای C, ε به ترتیب برابر ۰/۰۰۵، ۰/۴۳۵۳ و ۰/۳۱۴۵ است که در جدول (۱) نشان داده شده است.

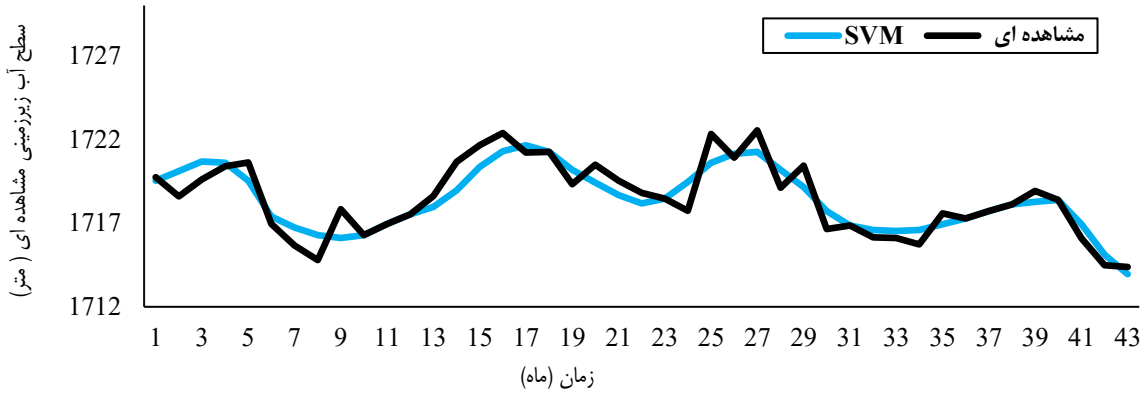
جدول ۱. شاخص های ارزیابی دقت مدل SVM با توابع فعال سازی مختلف در طول دوره آموزش و تست.

تابع کرنل	آموزش			تست		
	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	R^2
Radial basis	0.2456	0.8560	0.8981	0.2408	0.8569	0.8983
Sigmoid	0.2336	0.8655	0.8996	0.2287	0.8660	0.8998
Linear	0.2545	0.8413	0.8965	0.2497	0.8433	0.8971
Polynomial	0.2246	0.8740	0.9038	0.2218	0.8758	0.9048

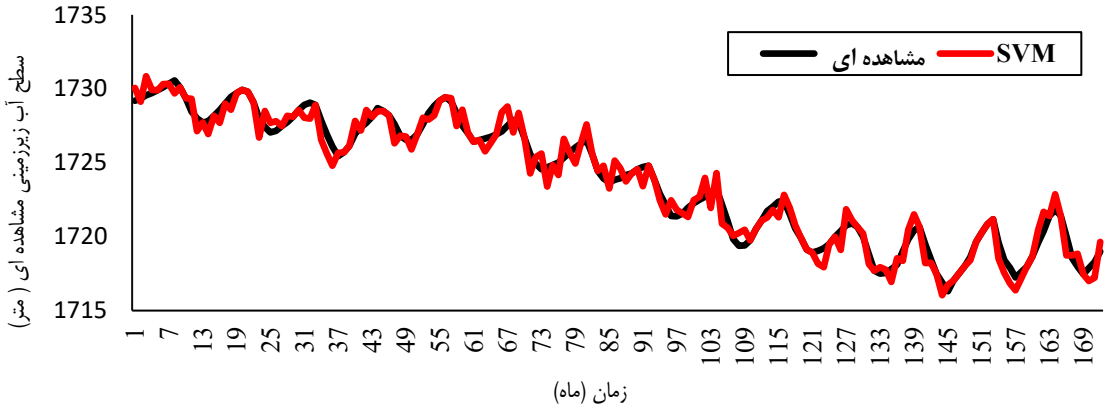
علاوه بر این بر اساس نتایج حاصل از این جدول شاخص‌های خطا مدل SVR با توابع کرنل مختلف در مرحله تست نسبت به مرحله آموزش بهتر هستند، این مسئله یکی از مهم‌ترین شاخص‌های برای ارزیابی احتمال بیش برازش شدن مدل است. بیش برازش در مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیون بردار پشتیبان زمانی رخ می‌دهد که مدل به طور بیش از حد به جزئیات داده‌های آموزشی وابسته شود و به‌جای یادگیری الگوهای کلی جزئیات تصادفی داده‌ها را نیز به‌عنوان الگو شناسایی کند. این امر سبب می‌شود مدل در هنگام پردازش داده‌های جدید (که در مجموعه آموزشی وجود نداشتند) عملکرد ضعیف‌تری نشان دهد و دقت پیش‌بینی کاهش یابد. در مدل‌های SVR، بیش برازش می‌تواند ناشی از انتخاب نادرست پارامترهایی مانند کرنل یا مقدار پارامتر C باشد که حساسیت مدل به داده‌ها را تعیین می‌کنند. برای مقابله با این مسئله، از روش‌هایی مانند تنظیم پارامترها از طریق اعتبارسنجی متقابل، کاهش ابعاد، استفاده می‌شود. این تکنیک‌ها کمک می‌کنند تا مدل از یادگیری الگوهای غیرعمومی اجتناب کرده و به تعادل بهینه‌ای بین دقت و پیچیدگی دست یابد که در نتیجه آن، عملکرد بهتری در مواجهه با داده‌های واقعی خواهد داشت. همچنین در شکل‌های ۱ تا ۴ مقدار سطح آب زیرمینی مشاهده شده و مقدار شبیه سازی شده به وسیله مدل های SVM (Polynomial)وSVM (Linear) در دوره آموزش و تست نشان‌داده‌شده است.



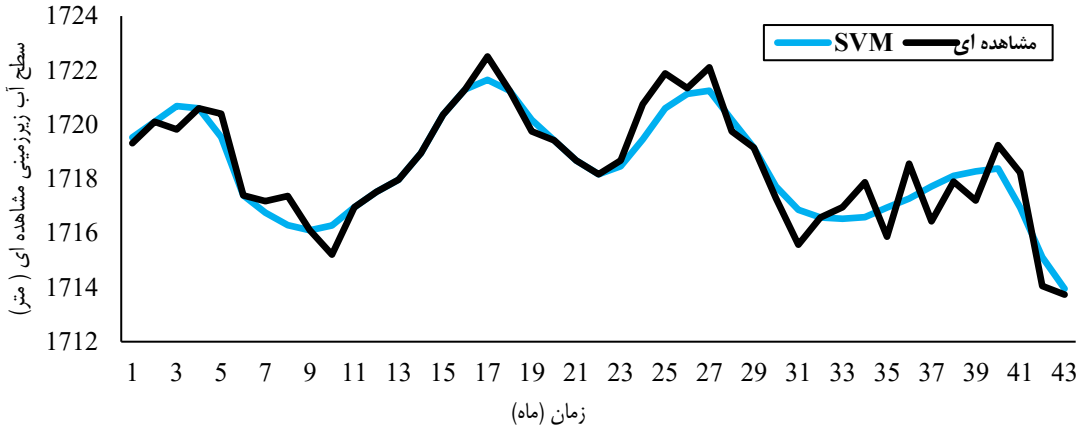
شکل ۱. عملکرد مدل SVM با تابع کرنل خطی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره آموزش



شکل ۲. عملکرد مدل SVM با تابع کرنل خطی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره تست



شکل ۳. عملکرد مدل SVM با تابع کرنل چندجمله ایی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره آموزش

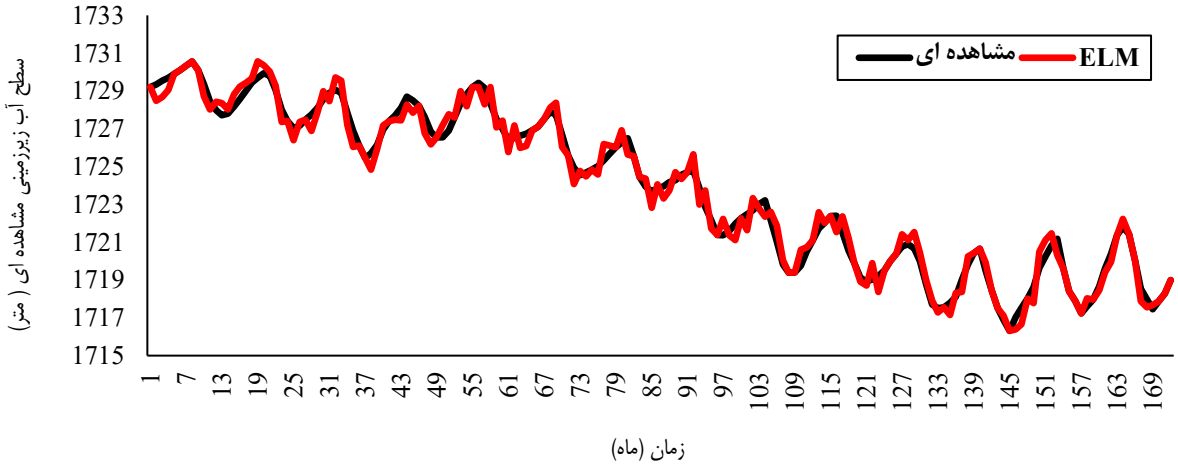


شکل ٤. عملکرد مدل SVM با تابع کرنل چندجمله ایی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره تست

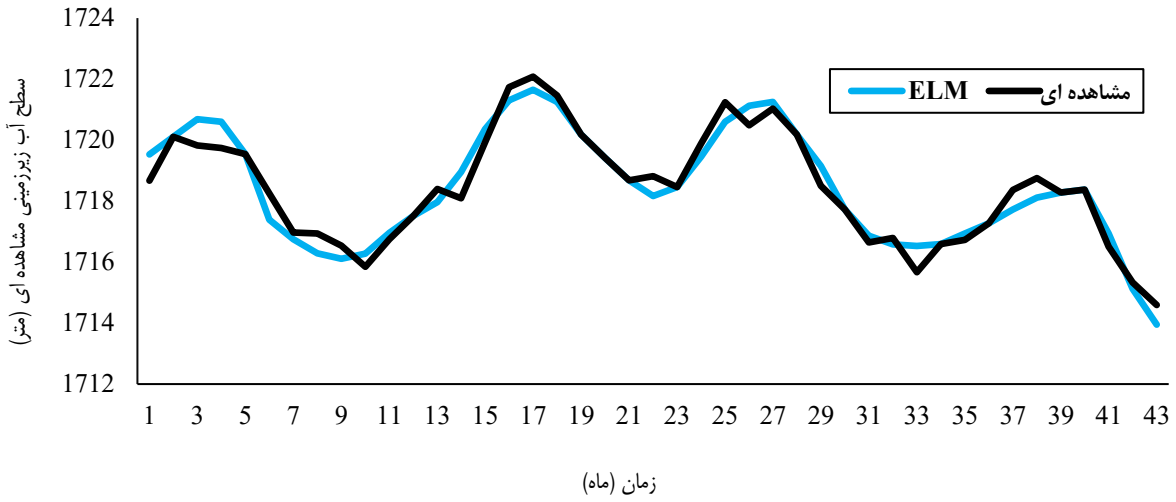
۱. مدل ELM

مانند مدل SVM برای انتخاب بهترین متغیرها برای توسعه مدل ELM نیز از روش سعی و خطا استفاده شد. به‌این‌ترتیب بعد از ارزیابی عملکرد این مدل با توجه فعال‌ساز مختلف مشخص شد که مدل ELM با متغیرهای ورودی سطح آب زیرزمینی در گام‌های زمانی t-1,t-2, t-3 و بارندگی در گام زمانی t بهترین عملکرد را دارد. به‌این‌ترتیب مدل ELM استفاده شده در این مطالعه از سه‌لایه تشکیل شده است. لایه ورودی این مدل شامل ۴ نورون است که هر کدام به ترتیب یکی از متغیرهای ورودی است (GW_{t-1},GW_{t-2},GW_{t-3},P_t). در لایه خروجی، یک نورون قرار دارد که نتیجه نهایی یعنی سطحآب زیرزمینی در گام زمانی t است (GW_t). تعداد نورون های لایه پنهان نیز با استفاده از روش سعی و خطا تنظیم شد.

در این مطالعه مانند مدل SVM برای بررسی عملکرد مدلELM ، از چهار تابع فعال‌سازی مختلف شامل خطی، RBF، سیگموید و چندجمله‌ای استفاده شد. جدول (۲) نتایج حاصل از این مدل با توابع فعال‌ساز مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این اطلاعات مدل ELM با تابع کرنل چندجمله‌ای و خطی به ترتیب بهترین و بدترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد. مقدار شاخص‌های RMSE, MSE , R^2 این مدل برای تابع کرنل خطی در مرخله آموزش به ترتب برابر ۰/۹۰۵۸، ۰/۸۸۶۰، ۰/۲۱۶۷ و برای مرحله تست به ترتیب برابر ۰/۹۰۶۶، ۰/۸۸۸۸، ۰/۲۱۲۸ هستند و برای تابع کرنل سیگموید در مرحله آموزش به تریب برابر ۰/۹۰۸۵، ۰/۹۰۲۸، ۰/۱۹۶۳ و برای مرحله تست به ترتیب برابر ۰/۹۰۸۸، ۰/۹۰۳۳ و ۰/۱۹۰۹ است.

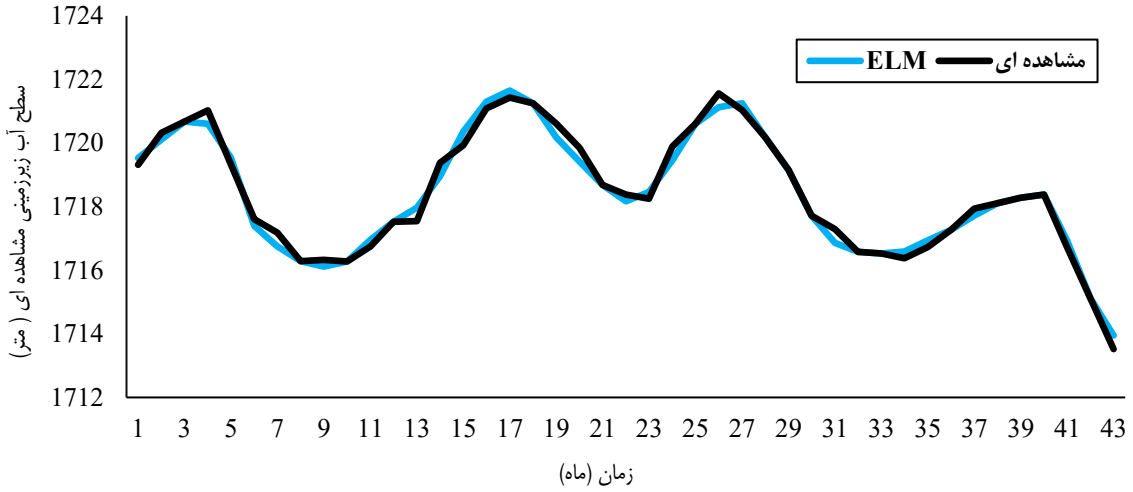


شکل ٥. عملکرد مدل ELM با تابع کرنل خطی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره آموزش



شکل ٦. عملکرد مدل ELM با تابع کرنل خطی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره تست

شکل ۷. عملکرد مدل ELM با تابع کرنل چندجمله ایی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره آموزش



شکل ۸. عملکرد مدل ELM با تابع کرنل چندجمله ایی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در طول دوره تست

جدول ۲. شاخص های ارزیابی دقت مدل ELM با توابع فعال سازی مختلف در طول دوره آموزش و تست

تابع فعال‌ساز	آموزش				تست		
	Number of Neurons	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE	R^2
Radial basis	32	0.2051	0.8960	0.9073	0.2020	0.8978	0.9078
Sigmoid	14	0.1963	0.9028	0.9085	0.1909	0.9033	0.9088
Linear	22	0.2167	0.8860	0.9058	0.2128	0.8888	0.9066
Polynomial	17	0.1747	0.9045	0.9097	0.1675	0.9048	0.9098

۲. مقایسه کارایی مدل‌های SVM و ELM

بعد از توسعه مدل‌های ELM و SVM نتایج آن‌ها از چندین جنبه با یکدیگر مقایسه شدند، بر اساس نتایج حاصل از اجرای این مدل‌ها با توابع کرنل مختلف و ارزیابی نتیجه آن‌ها با شاخص‌های خطا متفاوت مشخص شد که مدل ELM نسبت به مدل SVM کارایی بهتری دارد. به طور دقیق‌تر برای هر یک از توابع کرنل خطی، سیگموید، RBF و چندجمله‌ای مدل ELM نسبت به مدل SVM عملکرد بهتری دارد.

یکی از جنبه‌های مهم در ارزیابی مدل‌ها، ثبات عملکرد آن‌ها در مراحل آموزش و تست است. ELM با تابع فعال‌سازی چندجمله‌ای در هر دو مرحله، کمترین تغییرات را در مقادیر RMSE، NSE و R^2 نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، مقدار RMSE مدل ELM با تابع فعال‌سازی چندجمله‌ای از ۰/۱۷۴۷ در آموزش به ۰/۱۶۷۵ در تست تغییر کرده است، که نشان‌دهنده ثبات بالای این مدل در تعمیم‌پذیری و پیش‌بینی داده‌های جدید است. در مقابل، مدل SVM با کرنل چندجمله ایی در مرحله تست افزایش نسبی (RMSE از ۰/۲۲۴۶ در آموزش به ۰/۲۲۱۸ در تست) و کاهش جزئی NSE و R^2 را نشان می‌دهد، که نشان دهدنده حساسیت بیشتر آن به داده‌های جدید است. صرف نظر ار تفاوت هایی که هر دو مدل دارند اما هر دو مدل به شدت تحت تأثیر نوع تابع فعال‌سازی(برای ELM)یا کرنل (برایSVM)هستند. در مدل ELM، تفاوت عملکرد بین بهترین و ضعیف‌ترین تابع فعال ساز(چندجمله ایی در مقابل خطی) بسیار بارز است. این نشان می‌دهد که انتخاب تابع فعال‌سازی مناسب، نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد ELM دارد. به‌طور مشابه، در مدل SVM، کرنل چندجمله ایی نتایج بهتری نسبت به کرنل‌های خطی و RBFارائه داده است، اما تفاوت‌ها در این مدل کمتر محسوس هستند، که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری نسبی بیشتر SVM نسبت به انتخاب کرنل است.

یکی از چالش‌های مهم در استفاده ازSVM ، زمان زیاد محاسباتی است که برای بهینه‌سازی پارامترهای آن نیاز است. همان‌طور که النازی و گیتز[1] (۲۰۱۰) توضیح داده‌اند، در فرایند جستجوی شبکه برای بهینه‌سازیSVM ، مدل باید برای هر پارامتر در تعداد زیادی از نقاط شبکه ارزیابی شود. این جستجو که اغلب در ابعاد بزرگ و با مجموعه‌ای از پارامترهای پیچیده صورت می‌گیرد، به طور مستقیم منجر به افزایش هزینه‌های زمانی و محاسباتی می‌شود. ازآنجاکه این جستجو باید برای پیداکردن بهترین ترکیب پارامترها انجام شود، حجم محاسبات به‌ویژه در صورت افزایش اندازه داده و تعداد ویژگی‌ها بیشتر می‌شود .مدل ELM در این زمینه یک رویکرد کارآمدتر را به کار می‌گیرند. برخلافSVM ، این مدل به جستجوی شبکه برای تنظیم پارامترها نیازی ندارند، زیرا پارامترهای لایه پنهان آن‌ها به‌صورت تصادفی تنظیم می‌شوند و وزن‌های خروجی تنها با استفاده از روش‌های خطی محاسبه می‌شوند. این روش، همان‌طور که توسط ونگ و همکاران [2] (۲۰۱۵) توضیح داده شده، منجر به کاهش پیچیدگی محاسباتی و همچنین کاهش نیاز به انجام تنظیمات پارامترها می‌شود. در نتیجه، ELM به‌سرعت می‌توانند به نتایج مطلوبی دست پیدا کنند، بدون اینکه به جستجوی پیچیده‌ای برای بهینه‌سازی نیاز داشته باشند.

1. AlAnazi & Gates
2. Wang et al

مقایسه زمان موردنیاز برای توسعه مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (SVR) و ماشین یادگیری شدید (ELM) نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجه در عملکرد این دو روش از نظر سرعت محاسباتی است. بر اساس جدول (۳)، مدل ELM با همه توابع فعال ساز زمان کمتری نسبت به مدل SVRبرای فرآیند آموزش نیاز دارد. این برتری زمانی در شرایطی که حجم داده‌ها بزرگ یا نیاز به پردازش سریع اطلاعات وجود داشته باشد، می‌تواند یک مزیت کلیدی به شمار رود .به‌طور خاص، ELMبا تابع فعال‌ساز RBF کمترین زمان آموزش (۰/۰۲۷ ثانیه) را داشته است، در حالی که مدل SVRبا کرنل چندجمله ایی بیشترین زمان (۰/۰۷۶ ثانیه) را به خود اختصاص داده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل ELM نه تنها از لحاظ دقت عملکرد، بلکه از لحاظ کارایی زمانی نیز بهینه‌تر است. حتی در حالتی که تابع فعال‌ساز پیچیده‌تری مانند چند جمله ایی استفاده می‌شود، زمان آموزش ELM (۰/۰۶۴ ثانیه) کمتر از زمان مربوط به SVR (۰/۰۷۶ ثانیه) است. از سوی دیگر، مدل SVR به دلیل ساختار پیچیده‌تر و نیاز به تنظیم پارامترهای کرنل، زمان بیشتری برای آموزش صرف می‌کند. این امر به‌ویژه در شرایطی که نیاز به بهینه‌سازی مکرر پارامترها برای یافتن بهترین عملکرد وجود داشته باشد، می‌تواند یک چالش جدی باشد.

جدول ۳. مقایسه مدت زمان لارم برای آموزش مدل SVM و ELM

SVR		ELM	
تابع کرنل	زمان (s)	تابع فعال‌ساز	زمان (s)
Linear	0.045	Linear	0.028
RBF	0.039	RBF	0.027
Sigmoid	0.054	Sigmoid	0.046
Polynomial	0.076	Polynomial	0.064

علاوه بر این نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با تنظیمات بهینه تعداد نورون‌ها در لایه‌های پنهان و انتخاب تابع فعال‌سازی مناسب، مدل ELM قادر به ارائه پیش‌بینی‌های دقیقی از سطح آب زیرزمینی است. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آینده در بهبود مدل‌های شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی و سایر شبیه‌سازی‌های محیطی مورداستفاده قرار گیرد. در نهایت، انتخاب بین مدل‌های SVM و ELM به عوامل متعددی مانند نیازمندی‌های دقت، محدودیت‌های زمانی و منابع محاسباتی وابسته است. درحالی‌که مدل‌های ELM به دلیل سادگی ساختار و سرعت پردازش بالا در بسیاری از پروژه‌های کاربردی بهینه هستند، مدل‌های SVM همچنان در کاربردهایی که نیازمند دقت بالایی در جداسازی داده‌های پیچیده و غیرخطی هستند، برتری دارند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود مدل ELM با سرعت بیشتری به نتایج مناسب برسد که آن را به گزینه‌ای خوب برای پیش‌بینی سریع و دقیق سطح آب‌های زیرزمینی تبدیل می‌کند.

بحث

دشت بهار در شمال غربی استان همدان و در نزدیکی شهر بهار واقع شده است که این دشت با مساحتی گسترده، به دلیل برخورداری از خاک‌های حاصلخیز و منابع آبی زیرزمینی، نقش قابل‌توجهی در تأمین محصولات کشاورزی استاندارد دارد. در این مطالعه، داده‌های ۱۰ساله شامل سطح آب زیرزمینی، بارندگی، تبخیر و دما با گام زمانی ماهانه برای توسعه این مدل‌ها استفاده شد. تمامی متغیرها برای جلوگیری از بایاس شدن مدل‌ها به بازه ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند و شاخص‌های RMSE، NSE و R^2 برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها به کار گرفته شدند. این مطالعه به بررسی قابلیت مدل‌های یادگیری ماشین SVR و ELM در شبیه‌سازی سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک پرداخته است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل ELM، به‌ویژه با استفاده از تابع فعال‌سازی چندجمله‌ای، در هر دو مرحله آموزش و آزمون از نظر دقت و کارایی عملکرد بهتری نسبت به SVR داشته است. در مقابل، SVR به‌ویژه هنگام استفاده از توابع فعال‌ساز پیچیده حجم محاسباتی بیشتری دارد.

با بهره‌گیری از سرعت و سادگی مدل ELM، همراه با توانایی آن در پردازش کارآمد مجموعه‌داده‌های بزرگ، این مدل به‌عنوان یک جایگزین قابل‌اعتماد و محاسباتی کارآمد برای مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی است. نتایج این تحقیق اهمیت تحقیق بیشتر در رویکردهای ترکیبی و استفاده از توابع فعال‌سازی پیشرفته در مدل ELM را برای افزایش سازگاری آن با شرایط مختلف نشان می‌دهد. هدف تحقیقات آینده می‌تواند ادغام این مدل‌ها با سیستم‌های جمع‌آوری داده‌های و ارزیابی عملکرد آن‌ها در آبخوان‌های مختلف باشد. علاوه بر این، بررسی تأثیر تکنیک‌های انتخاب متغیر ورودی و پیش‌پردازش داده‌ها بر عملکرد مدل می‌تواند قابلیت‌های پیش‌بینی رویکردهای یادگیری ماشین را بهبود بخشد. باتوجه‌به این جنبه‌ها، این تحقیق به‌عنوان یک مبنا برای توسعه سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری قوی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عمل می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آن‌هاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

ملک‌زاده، مریم.، کاردار، سعید.، صائب، کیوان.، شعبانلو، سعید.، و تقوی، لعبت. (۱۳۹۷). پیش‌بینی تراز آب زیر زمینی با استفاده از مدل‌های مادفلو، ماشین آموزش نیرومند و ویولت-ماشین آموزش نیرومند. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۵) ، ۴۹۶-۵۰۱. https://www. wrr.ir/article_66468.html

References

Afruzi, A., Zare Abyaneh, H., & Abdolabadi, H. (2021). Local strategies to manage groundwater depletion under climate change scenarios—a case study: Hamedan-Bahar Plain (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(15), 1548. http://dx.doi.org/10.1007/s12517-021-07773-1

Ahmadi, A., Olyaei, M., Heydari, Z., Emami, M., Zeynolabedin, A., Ghomlaghi, A., Daccache, A., Fogg, G. E., & Sadegh, M. (2022). Groundwater level modeling with machine learning: a systematic review and meta-analysis. *Water*, 14(6), 949. https://doi.org/10.3390/w14060949

Ahmed, H. U., Mostafa, R. R., Mohammed, A., Sihag, P., & Qadir, A. (2023). Support vector regression (SVR) and grey wolf optimization (GWO) to predict the compressive strength of GGBFS-based geopolymer concrete. *Neural Computing and Applications*, 35(3), 2909-2926. https://doi.org/10.1007/s00521-022-07724-1

Alizamir, M., Kazemi, Z., Kazemi, Z., Kermani, M., Kim, S., Heddam, S., Kisi, O., & Chung, I.-M. (2023). Investigating landfill leachate and groundwater quality prediction using a robust integrated artificial intelligence model: Grey wolf metaheuristic optimization algorithm and extreme learning machine. *Water*, 15(13), 2453. https://doi.org/10.3390/w15132453

Aman Jalili, A., Najarchi, M., Shabanlou, S., & Jafarinia, R. (2023). Multiobjective optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines. *Environ Sci Pollut Res*, 30,16464–16475. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22723-4

Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S. Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. *Earth Sci Inform*, 16, 3227–3241. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1

Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2023) Modelling and prediction of groundwater level using wavelet transform and machine learning methods: A case study for the Sahneh Plain, Iran. *Irrigation and Drainage*, 72(3), 747–762. https://doi.org/10.1002/ird.2794

Azizpour, A., Izadbakhsh, M. A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2021). Estimation of water level fluctuations in groundwater through a hybrid learning machine. *Groundwater for Sustainable Development*, 15, 100687. http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100687

Balali, H., & Kasbian Lal, F. (2022). Economic Valuation of Groundwater in Agriculture Sector (Case Study: Hamedan-Bahar Plain). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 36(1), 37-48. https://doi.org/10.22067/jead.2022.72334.1079

Balogun, A.-L., Rezaie, F., Pham, Q. B., Gigović, L., Drobnjak, S., Aina, Y. A., Panahi, M., Yekeen, S. T., & Lee, S. (2021). Spatial prediction of landslide susceptibility in western Serbia using hybrid support vector regression (SVR) with GWO, BAT and COA algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101104. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.10.009

Band, S. S., Heggy, E., Bateni, S. M., Karami, H., Rabiee, M., Samadianfard, S., Chau, K.-W., & Mosavi, A. (2021). Groundwater level prediction in arid areas using wavelet analysis and Gaussian process regression. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1147-1158. http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2021.1944913

Esmaeili, F., Shabanlou, S., & Saadat, M. (2021). A wavelet-outlier robust extreme learning machine for rainfall forecasting in Ardabil City, Iran. *Earth Sci Inform*. 14, 2087–2100. https://doi.org/10.1007/s12145-021-00681-8

Fallahi, M.M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & IzadBakhsh, M.A. (2023). Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Appl Water Sci*. 13(143). https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8

Gaur, S., Johannet, A., Graillot, D., & Omar, P. J. (2021). Modeling of groundwater level using artificial neural network algorithm and WA-SVR model. *Groundwater resources development and planning in the semi-arid region*, Springer, Cham, New York Sity, United states. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-68124-1_7

Gharib, R., Heydari, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of discharge coefficient of side weirs placed on convergent canals using modern self-adaptive extreme learning machine. *Appl Water Sci*, 10, 50. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1136-0

Ghobadi, A., Cheraghi, M., Sobhanardakani, S., Lorestani, B., & Merrikhpour, H. (2020). Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, *West of Iran. Environmental Earth Sciences*, 79(18), 428. https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-020-09177-y

Huang, G.-B., Wang, D. H., & Lan, Y. (2011). Extreme learning machines: a survey. *International journal of machine learning and cybernetics*, 2, 107-122. http://dx.doi.org/10.1007/s13042-011-0019-y

Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., & Siew, C.-K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D., & Ross, A. (2016). Integrated groundwater management. *Springer Nature*, Cham, New York Sity, United states. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9

Jalilian, A., Heydari, M., Azari, A., & Shabanlou, S. (2022). Extracting optimal rule curve of dam reservoir base on stochastic inflow. *Water Resour Manage*, 36, 1763–1782. https://doi.org/10.1007/s11269-022-03087-3

Kinzelbach, W., Bauer, P., Siegfried, T., & Brunner, P. (2003). Sustainable groundwater management—problems and scientific tools. *Episodes Journal of International Geoscience*, 26(4), 279-284. http://dx.doi.org/10.18814/epiiugs/2003/v26i4/002

Kumar, D., Roshni, T., Singh, A., Jha, M. K., & Samui, P. (2020). Predicting groundwater depth fluctuations using deep learning, extreme learning machine and Gaussian process: a comparative study. *Earth Science Informatics*, 13(4), 1237-1250. https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-020-00508-y

Levintal, E., Kniffin, M. L., Ganot, Y., Marwaha, N., Murphy, N. P., & Dahlke, H. E. (2023). Agricultural managed aquifer recharge (Ag-MAR)—a method for sustainable groundwater management: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(3), 291-314. https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2050160

Li, J., Lu, W., Wang, H., Fan, Y., & Chang, Z. (2020). Groundwater contamination source identification based on a hybrid particle swarm optimization-extreme learning machine. *Journal of Hydrology*, 584, 124657. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124657

Malekzadeh, M., Kardar, S., Saeb, K., Shabanlou, S., Taghavi, L. (2019). 'Prediction of Groundwater Level using MODFLOW, Extreme Learning Machine and Wavelet-Extreme Learning Machine Models. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 496-501. (In Persian) https://www.iwrr.ir/article_66468.html

Mallick, J., Naikoo, M. W., Talukdar, S., Ahmed, I. A., Rahman, A., Islam, A. R. M. T., Pal, S., Ghose, B., & Shashtri, S. (2022). Developing groundwater potentiality models by coupling ensemble machine learning algorithms and statistical techniques for sustainable groundwater management. *Geocarto International*, 37(25), 7927-7953. http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2021.1987535

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2023). A hybrid machine learning model for modeling nitrate concentration in water sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 721. http://dx.doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101062. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062

Mirarabi, A., Nassery, H., Nakhaei, M., Adamowski, J., Akbarzadeh, A., & Alijani, F. (2019). Evaluation of data-driven models (SVR and ANN) for groundwater-level prediction in confined and unconfined systems. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-15. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-019-8474-y

Moghadam, R.G., Yaghoubi, B., Rajabi, A., Shabanlou, S., & Izadbakhsh, M.A. (2022). Evaluation of discharge coefficient of triangular side orifices by using regularized extreme learning machine. *Appl Water Sci*, 12, 145. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01665-9

Mohammed, K.S., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level fluctuations using artificial intelligence-based models and GMS. *Appl Water Sci*, 13, 54 (2023). https://doi.org/10.1007/s13201-022-01861-7

Norouzi Khatiri, K., Nematollahi, B., Hafeziyeh, S., Niksokhan, M. H., Nikoo, M. R., & Al-Rawas, G. (2023). Groundwater management and allocation models: a review. *Water*, 15(2), 253. https://doi.org/10.3390/w15020253

Panahi, J., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2022). Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. *J Hydroinf*, 24(4), 875–897. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.022

Panahi, M., Sadhasivam, N., Pourghasemi, H. R., Rezaie, F., & Lee, S. (2020). Spatial prediction of groundwater potential mapping based on convolutional neural network (CNN) and support vector regression (SVR). *Journal of Hydrology*, 588, 125033. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125033

Rafieemehr, H., Kozegarkaleji, L. (2021). Analyzing spatiotemporal relationship between land use changes and groundwater quantity in Hamadan north plains. *Environmental Sciences*, 19(1), 259-276. https://doi.org/10.52547/envs.29307

Roshni, T., Mirzania, E., Hasanpour Kashani, M., Bui, Q.-A. T., & Shamshirband, S. (2022). Hybrid support vector regression models with algorithm of innovative gunner for the simulation of groundwater level. *Acta Geophysica*, 70(4), 1885-1898. https://doi:10.1007/s11600-022-00826-3

Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 63-71. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003

Shahbazi, M., Zarei, H., & Solgi, A. (2023). De-noising groundwater level modeling using data decomposition techniques in combination with artificial intelligence (case study Aspas aquifer). *Applied Water Science*, 13(4), 88. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01885-7

Singh, A., Patel, S., Bhadani, V., Kumar, V., & Gaurav, K. (2024). AutoML-GWL: Automated machine learning model for the prediction of groundwater level. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107405. http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107405

Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and computing*, 14, 199-222. https://doi.org/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88

Sun, J., Hu, L., Li, D., Sun, K., & Yang, Z. (2022). Data-driven models for accurate groundwater level prediction and their practical significance in groundwater management. *Journal of Hydrology*, 608, 127630. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127630

Tang, W., Zhao, X., Motagh, M., Bi, G., Li, J., Chen, M., Chen, H., & Liao, M. (2022). Land subsidence and rebound in the Taiyuan basin, northern China, in the context of inter-basin

water transfer and groundwater management. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112792. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112792

Tao, H., Hameed, M. M., Marhoon, H. A., Zounemat-Kermani, M., Heddam, S., Kim, S., Sulaiman, S. O., Tan, M. L., Sa'adi, Z., & Mehr, A. D. (2022). Groundwater level prediction using machine learning models: A comprehensive review. *Neurocomputing*, 489, 271-308. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.03.014

Zhang, F., & O'Donnell, L. J. (2020). Support vector regression. *Machine learning*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 123-140.http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00007-9

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Smart technologies in agriculture: water and resource management in the Era of climate change

Hossein Zahedpour Yeganeh[1], **Afshin Khorsand**[2✉], **Omid Raja**[3], and **Elahe Kanani**[4]

1. Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), East Azerbaijan, Maragheh, Iran. E-mail: zahedpoor.hossein@gmail.com
2. Corresponding author, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: af.kh67@gmail.com
3. Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: omid.raja@ut.ac.ir
4. Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin., Iran. E-mail: el.kanani92@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 10 February 2025
Received in revised from 12 April 2024
Accepted 29 June 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
climate adaptation,
data-driven decision-making,
precision agriculture,
remote monitoring,
sensors technology.

ABSTRACT

Objective: Driven by the motivation to find innovative and efficient solutions for irrigation management, this research delves into the precise examination of indirect methods for measuring soil moisture and advanced techniques in automated and smart irrigation. Its ultimate goal is to explore current knowledge and evaluate new approaches that can, while optimizing water consumption and increasing productivity, effectively address the complex technical challenges in this field. With a focus on practical and sustainable solutions, this study strives to establish a foundation for the development of smart and environmentally friendly agriculture.

Method: The study reviews sensors used in smart agriculture (rainfall, temperature, etc.) and equipment for irrigation, frost monitoring, plant protection, and crop monitoring. It analyzes their features to optimize farming and reduce resource use, improving efficiency and sustainability.

Results: Smart technologies can boost agricultural efficiency and productivity, especially for water management in water-scarce countries like Iran, making smart agriculture essential. While proven in developed countries, Iran needs specific infrastructure for success. Intelligent systems improve plant performance, cut water waste, and reduce pollution. With internet access in rural areas, smart irrigation, using sensors like TDR and PR2, can automate irrigation via the Internet of Things. Important factors include sensor accuracy, power, cost, and salinity effects. Two-way wireless networks (WSAN) enable monitoring and control of irrigation. Future planning should combine soil, water, and climate monitoring with predictive control, focusing on dynamic processes and the impact of intelligent monitoring on irrigation efficiency, given the uncertainties in agricultural-irrigation systems.

Conclusions: With the power to prevent diseases, protect crops from frost, and eliminate storage losses, these technologies revolutionize the efficiency and performance of agricultural processes. Ultimately, implementing smart agriculture and using soil moisture sensors goes beyond just saving water; it's an unparalleled strategy for overcoming climate challenges and the overwhelming pressures on agricultural systems.

Cite this article: Zahedpour Yeganeh, H., Khorsand, A., Raja, O., & Kanani, E. (2025). Smart technologies in agriculture: water and resource management in the Era of climate change. *Advanced Technologies in Water Efficiency, 5* (3), 20-43. https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11765.1155

© The Author(s)
Publisher: Razi University.
https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11765.1155

Introduction

Smart agriculture, the third Green Revolution, uses information technology (like big data, AI, and IoT) to increase agricultural product quality and quantity while reducing resource consumption (Chidambaranathan et al., 2018). Climate-Smart Agriculture (CSA) helps farmers adapt to climate change and ensure food security. These systems enable quick, effective decision-making through data collection and analysis, using satellites, drones, and sensors to monitor soil moisture, crop health, and environmental conditions in real-time (De Pinto et al., 2020). As a result, farmers can optimize water use, reduce costs, and increase efficiency, contributing to sustainable agricultural practices. Remote monitoring and integrating knowledge with new technologies boosts productivity and resilience, ultimately supporting the overall sustainability of the farming industry.

Methodology

This research takes a comprehensive approach, conducting an in-depth review of commonly used sensors in smart agriculture and optimal irrigation management. This review covers a wide range of sensors (rainfall, temperature, leaf, light, wind, air pressure, soil temperature, soil moisture, water, snow, and plant sensors), as well as strategic equipment (irrigation management tools, frost monitoring systems, plant protection equipment, growth and nutrition equipment, agricultural machinery performance tracking, and crop monitoring devices). This study not only analyzes the features and capabilities of this equipment in detail but also explains their roles in optimizing agricultural processes and reducing resource consumption using a scientific and precise method. The aim of this approach is to provide a deeper understanding of how to improve efficiency and sustainability in modern agricultural systems, as well as to offer practical solutions for enhancing agricultural performance through the use of advanced technologies.

Results and discussion

In this context, leveraging modern tools and smart technologies plays a crucial role in enhancing the efficiency and productivity of agricultural processes. Optimal water resource management, particularly in countries like Iran facing decreased rainfall, is a primary goal of smart agriculture. Implementing smart technologies can lead to more effective water resource utilization, making smart agriculture an unavoidable necessity in the agricultural production sector. Although the benefits of this technology have been proven in developed countries, its success in Iran requires specific considerations and the establishment of appropriate infrastructure. Research indicates that using intelligent systems can improve plant performance, reduce water losses, and minimize environmental pollution from agricultural activities. Today, access to the internet and smartphones is possible in most rural areas, providing opportunities for young people to widely utilize available facilities. Employing smart irrigation methods is recognized as an effective solution for managing crises and conserving water resources. Capacitive and impedance sensors, as well as sensors like TDR, FDR, and PR2, are used to facilitate automated irrigation within the Internet of Things framework. For implementing automated irrigation systems, the PR2 sensor, along with software like Datalink Logger, is used, enabling the recording of soil moisture at different depths and determining the volume of water and timing for switching irrigation on and off. When using these sensors, factors such as installation accuracy, scaling, calibration issues, power supply, costs, and salinity effects on soil moisture must be considered. A two-way wireless sensor network (WSAN) offers the opportunity to monitor sensor performance and activate electric valves for initiating irrigation based on real-time feedback and performance data. In summary, the combination of soil, water,

and climate-based monitoring methods, along with a discrete predictive control approach, should be considered in planning. Given that agricultural irrigation systems face uncertainties, future studies should focus on developing dynamic process approaches for irrigation systems and the impact of intelligent monitoring and control methods on irrigation efficiency.

Conclusions

This research demonstrates that implementing smart technologies and advanced sensors optimizes irrigation management and enhances agricultural productivity. Given current challenges like climate change and reduced rainfall, smart agriculture is an undeniable necessity. Diverse sensors (such as PR2, TDR, and FDR) enable automated irrigation and optimal water resource management. Internet and mobile technology access in rural areas offers new opportunities for youth. Ultimately, addressing Iran's specific cultural and infrastructural requirements is crucial for the success of these technologies. By adopting data-driven approaches and real-time monitoring, improvements in plant performance and reductions in environmental pollution can be achieved. Smart agriculture adapts to climate change and varying climates by using smart monitoring for risk management, selecting resilient crop varieties with plant sensors, and employing supplemental irrigation guided by soil moisture sensors in dry regions. It also uses specific tools like FDR/TDR sensors for precise irrigation in arid climates, temperature/humidity sensors for disease prediction in temperate zones, and drainage sensors against waterlogging in humid climates. This approach optimizes resources and builds resilience.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data and links available on request from the authors.

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

تکنولوژی‌های هوشمند در کشاورزی: مدیریت آب و منابع در عصر تغییرات اقلیمی

حسین زاهدپوریگانه[۱]، افشین خورسند[۲]✉، امید رجا[۳]، و الهه کنعانی[۴]

۱. موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران. رایانامه: zahedpoor.hossein@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: af.kh67@gmail.com
۳. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: omid.raja@ut.ac.ir
۴. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: el.kanani92@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
تصمیم‌گیری مبتنی بر داده،
سازگاری با اقلیم،
فناوری حسگرها،
کشاورزی دقیق،
نظارت از راه دور.

چکیده

هدف: این پژوهش باانگیزه یافتن راهکارهایی نوین و کارآمد در عرصه مدیریت آبیاری، به بررسی عمیق روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک و فنون پیشرفته اتوماسیون آبیاری و آبیاری هوشمند می‌پردازد. هدف غایی، کاوش در دانش روز و ارزیابی رویکردهای نوآورانه و مؤثری است که بتوانند ضمن بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای بهره‌وری، پاسخی شایسته به چالش‌های فنی پیچیده در این حوزه باشند. این مطالعه، با تمرکز بر یافتن راه‌حل‌های عملی و پایدار، می‌کوشد تا زمینه‌ای را برای توسعه کشاورزی هوشمند و سازگار با محیط زیست فراهم آورد.

روش پژوهش: این مطالعه به بررسی حسگرهای مورداستفاده در کشاورزی هوشمند (بارندگی، دما و غیره) و تجهیزات آبیاری، پایش سرمازدگی، حفاظت از گیاهان و پایش محصولات می‌پردازد و ویژگی‌های آن‌ها را برای بهینه‌سازی کشاورزی، کاهش مصرف منابع و بهبود کارایی و پایداری تجزیه‌وتحلیل می‌کند.

یافته‌ها: فناوری‌های هوشمند می‌توانند بهره‌وری و بازدهی کشاورزی را افزایش دهند، به ویژه در مدیریت آب در کشورهای کم‌آب مانند ایران که کشاورزی هوشمند را ضروری می‌سازد. در حالی که کارآیی آنها در کشورهای توسعه‌یافته ثابت شده است، موفقیت در ایران نیازمند زیرساخت‌های خاص است. سیستم‌های هوشمند عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشند، اتلاف آب را کاهش می‌دهند و آلودگی را به حداقل می‌رسانند. با دسترسی گسترده به اینترنت در مناطق روستایی، آبیاری هوشمند با استفاده از حسگرهایی مانند TDR و PR2 می‌تواند فرآیندها را از طریق اینترنت اشیا خودکار کند. ملاحظات مهم شامل دقت حسگر، منبع تغذیه، هزینه و اثرات شوری است. شبکه‌های حسگر بی‌سیم دوطرفه (WSAN) امکان پایش و کنترل آبیاری را فراهم می‌کنند. برنامه‌ریزی آینده باید پایش خاک، آب‌وهوا را با کنترل پیش‌بینی‌کننده ادغام کند و بر فرآیندهای پویا و تأثیر پایش هوشمند بر کارایی آبیاری، باتوجه‌به عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های آبیاری کشاورزی، تمرکز کند.

نتیجه‌گیری: با توانایی جلوگیری از بیماری‌ها، محافظت از محصولات در برابر سرمازدگی و از بین بردن ضایعات ذخیره‌سازی، این فناوری‌ها انقلابی در کارایی و عملکرد فرآیندهای کشاورزی ایجاد می‌کنند. در نهایت، پیاده‌سازی کشاورزی هوشمند و استفاده از حسگرهای رطوبت خاک، فراتر از صرفه‌جویی در آب، راهبردی بی‌نظیر برای غلبه بر چالش‌های آب‌وهوایی و فشارهای طاقت‌فرسا بر سیستم‌های کشاورزی ارائه می‌دهد.

استناد: زاهدپور یگانه، حسین؛ خورسند، افشین؛ رجا، امید؛ و کنعانی، الهه. (۱۴۰۴). تکنولوژی‌های هوشمند در کشاورزی: مدیریت آب و منابع در عصر تغییرات اقلیمی. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۳)، ۴۳-۲۰.
https//doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11765.1155

CC BY NC
© نویسندگان
ناشر: دانشگاه رازی.

مقدمه

کشاورزی به‌عنوان صنعت نخست جهان، نقش‌محوری در شکل‌گیری جامعه بشری ایفا می‌کند و اساس توسعه پایدار و اقتصادی جوامع را تشکیل می‌دهد. این صنعت با تغییرات عظیمی مواجه است و تکامل آن در آینده به عوامل مختلفی وابسته است. تغییرات آب‌وهوایی، رشد جمعیت و افزایش درآمد از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر این صنعت تأثیر بگذارند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده توسط سازمان جهانی غذا و کشاورزی[1]، فعالیت‌های انسانی منجر به تخریب یک‌چهارم از سطح خاکی کره زمین شده است (سولاو[2]، ۲۰۲۱). این تخریب زمین‌ها به‌شدت بر امنیت غذایی تأثیر دارد، زیرا سلامت خاک یکی از ارکان مهم تأمین غذای جوامع به شمار می‌آید. نرخ رشد جمعیت جهانی، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه، فشار بیشتری بر سیستم‌های تولید غذا وارد کرده و بر اساس گزارش‌های سازمان کشاورزی و غذای ملل متحد، نیاز به مواد غذایی تا سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۰۶ حدود ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت (کایا و کرن[3]، ۲۰۰۶). همچنین، گزارش‌ها نشان می‌دهند که در آینده، تعداد افرادی که با کمبود آب مواجه خواهند شد، از ۹۳۳ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ به حدود ۲ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد (هِی و همکاران[4]، ۲۰۲۱). این تهدیدات به‌ویژه در نواحی با منابع آبی محدود، در صورت عدم مدیریت صحیح، مشکل‌ساز خواهند شد. باوجود این چالش‌ها، کشاورزی هنوز هم‌پتانسیل‌های بزرگی برای ایجاد جامعه‌ای شاد و سالم دارد. این حوزه به‌عنوان یکی از مشاغل سخت و پرچالش دنیا، به صبر، دقت و کارایی بالا نیاز دارد. درعین‌حال، کشاورزی با چالش‌های مختلفی مواجه است که شامل عدم تعادل در استفاده از سفره‌های آب زیرزمینی، ناهماهنگی بین برنامه‌های آب و کشاورزی، کمبود حمایت از خصوصی‌سازی و پایین‌بودن بهره‌وری زمین، آب و انرژی است. همچنین، پایین‌بودن سرانه اراضی کشاورزی، عدم وجود نظام بهره‌برداری مناسب، و هزینه‌های بالای تولید از جمله مسائل دیگر به شمار می‌آیند. لازم به ذکر است که کارشناسان و متخصصان کشاورزی در سرتاسر جهان در حال کار برای مدیریت این محدودیت‌ها و چالش‌ها هستند. آن‌ها به دنبال افزایش کارایی و عملکرد این صنعت با بهره‌برداری از فناوری‌های نوین و بهبود روش‌های کشاورزی هستند. در نهایت، تلاش برای برقراری سیاست‌های مستمر و کارآمد در این حوزه، می‌تواند به تثبیت زنجیره تأمین و بهبود شرایط امنیت غذایی در سطح جهانی کمک کند (کشاورز و همکاران، ۱۴۰۰).

کشاورزی هوشمند که به انقلاب سبز سوم شهرت دارد، به مجموعه‌ای از روش‌های نوین مدیریتی اشاره می‌کند که هدف آن افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی، بهبود کارایی و کاهش مصرف منابع با استفاده از فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی است (ثابت و محمدپور، ۱۴۰۰). این رویکرد به‌تدریج به یک ضرورت برای آینده کشاورزی تبدیل شده است. در اجلاس لاههٔ ۲۰۱۰ تحت عنوان کشاورزی، امنیت غذایی و تغییرات اقلیمی، FAO مفهوم کشاورزی هوشمند اقلیم[5] (CSA) را معرفی کرد. در این اجلاس تأکید شد که عدم تغییر در سیاست‌گذاری‌های کنونی کشاورزی می‌تواند منجر به افزایش خطرات انسانی و مالی و تبدیل کشاورزی به نظامی ناتوان در تأمین امنیت غذایی شود (لیپر[6]، ۲۰۱۸). CSA به‌عنوان یک رویکرد کارآمد، به کشاورزان کمک می‌کند تا خود را با تغییرات آب‌وهوایی سازگار کنند و سیستم‌های کشاورزی را به‌منظور حفظ امنیت غذایی و بهبود انعطاف‌پذیری در برابر چالش‌ها بهینه‌سازی کنند (کاظم علیلو و جمشیدی، ۱۴۰۱). همچنین، خودکارسازی عملیات کشاورزی به‌طور کلی به بهبود عملکرد محصولات، کاهش مصرف آب و اثرات زیست‌محیطی منجر می‌شود (توسن و همکاران، ۱۴۰۳). نتایج به‌کارگیری فناوری‌های اطلاعات در کشاورزی شامل مصرف بهینه نهاده‌ها، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش سختی کار، بهبود سلامتی محصول و افزایش بهره‌وری هستند که در نهایت به حفظ کشاورزی پایدار کمک می‌کند (باقری، ۱۳۹۸). شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف آب، حفظ خاک، مدیریت پایدار زمین، حفاظت از منابع طبیعی، حفظ اکوسیستم‌ها و ارائه مزایای تغییرات اقلیمی کمک کند. برای دستیابی به این اهداف، نیاز به اطلاعات دقیق و تغییری بزرگ در نحوه مدیریت این منابع وجود دارد (فائو[7]،۲۰۲۲).

1. Food and Agriculture Organization
2. SOLAW
3. Kaya and Curran
4. He et al
5. Climate Smart Agriculture
6. Lipper
7. FAO

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

کشاورزی هوشمند بر مبنای جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی داده‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی از راه دور استوار است و با تجزیه‌وتحلیل اطلاعات، امکان تصمیم‌گیری سریع و مؤثر را فراهم می‌آورد (چیدامباراناتان و همکاران[1]، ۲۰۱۸). در آینده، صنعت کشاورزی برای جمع‌آوری اطلاعات لحظه‌ای درباره وضعیت محصولات به فناوری‌هایی نظیر ماهواره‌ها، پهپادها، حسگرها و سیستم‌های هوشمند وابسته خواهد شد. این اطلاعات، به همراه پایگاه‌داده‌های هواشناسی و کشت محصول، به کشاورزان در اتخاذ تصمیمات روزانه کمک می‌کنند و ابعاد فنی، اقتصادی و بازار محصول را در برخواهند گرفت (گرامی طیبی، ۱۳۹۶). نتایج موفقیت‌آمیز طرح‌های موجود نشان می‌دهد که کشاورزان، سیاست‌گذاران و سازمان‌های بین‌المللی به استفاده از شیوه‌های CSA در توسعه کشاورزی علاقمند هستند که در مناطق جغرافیایی مختلفی از جمله آفریقا، آسیا، اروپا و آمریکای لاتین انجام شده است (دی‌پینتو و همکاران[2]، ۲۰۲۰). از مهم‌ترین راهکارهای مدیریت بهینه مصرف آب و افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی، تغییر شیوه‌های سنتی آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری است. این روش‌ها نه‌تنها به بهبود زراعت کمک می‌کنند؛ بلکه از فرسایش خاک نیز جلوگیری می‌کنند (پورکریمی و همکاران، ۱۳۹۳). زمان آبیاری در هر روش آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا بیش‌آبیاری یا کم آبیاری ناشی از غفلت و ناآگاهی کشاورزان از نیاز رطوبتی گیاهان باعث هدررفت سالانه محصولات می‌شود مشکلاتی نظیر کاهش رطوبت خاک و آبیاری نادرست موجب این چالش‌ها می‌گردند (بیابی و همکاران[3]، ۲۰۲۰).

پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند با هشدارهای قطع و وصل آبیاری و استفاده بهینه از اطلاعات این سامانه‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی از مصرف بی‌رویه آب جلوگیری کند (آذر و همکاران[4]، ۲۰۲۰). افزایش بهره‌وری در تولید نیازمند به‌کارگیری دانش و فناوری‌های نوین است، و لذا باید از آخرین پیشرفت‌ها در حوزه‌های مختلف مانند الکترونیک، رایانه و هوش مصنوعی استفاده کرد. آینده تولید پایدار کشاورزی وابسته به این فناوری‌هاست که می‌توانند مقیاس، کارآیی و اثربخشی تولید را در زنجیره تأمین کالا افزایش دهند (نهامو و همکاران[5]، ۲۰۱۷). کشاورزی هوشمند، یکی از این فناوری‌ها است که می‌تواند اثرات منفی تولید را کاهش دهد (چیدامباراناتان و همکاران، ۲۰۱۸). ازآنجاکه کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است، کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری در این بخش ضروری است (حسنی و همکاران، ۱۳۹۹). سیستم آبیاری هوشمند یکی از راهکارهای مؤثر برای جلوگیری از هدررفت آب در مقیاس‌های مختلف، از باغچه‌های کوچک تا مزارع بزرگ است. باتوجه‌به شرایط گرم و خشک ایران و هدررفت ۸۰ تا ۹۰ درصد آب کشور در بخش کشاورزی، نیاز به اصلاح روش‌های آبیاری فوری به چشم می‌خورد. در مقایسه با کنترلرهای قدیمی که بر اساس برنامه‌های ثابت عمل می‌کنند، کنترلرهای آبیاری هوشمند وضعیت آب‌وهوا، شرایط خاک و میزان تبخیر را اندازه‌گیری کرده و به‌طور خودکار زمان‌بندی آبیاری را باتوجه‌به نیاز واقعی زمین انجام می‌دهد. این قابلیت‌ها باعث بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش کارایی آبیاری می‌شود (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲). این سیستم‌ها، با نظارت دقیق بر مصرف آب، به مدیریت بهتر در جوامع هوشمند کمک می‌کنند (طباطبایی و همکاران[6]، ۲۰۲۲). مطالعه گنارو و همکاران[7] (۲۰۲۴) نشان داد که چگونه اتخاذ یک سیستم آبیاری هوشمند متشکل از شبکه‌های حسگر بی‌سیم و الگوریتم‌های کنترل پیشرفته مبتنی بر مدل‌های تبخیر و تعرق می‌تواند به استفاده پایدارتر از آب در کشاورزی کمک کند. در تحقیق ایشان، اجرای تدریجی سیستم از یک راه‌اندازی معمولی در سال ۲۰۲۱ به یک راه‌حل کاملاً خودکار تا سال ۲۰۲۳، کاهش مصرف آب را تا ۵۰ درصد در مقایسه با روش‌های آبیاری سنتی امکان‌پذیر کرد.

در سامانه‌های آبیاری هوشمند، آب تنها به میزان نیاز واقعی گیاه و خاک تأمین می‌شود که این یکی از بزرگ‌ترین مزایای هوشمندسازی است. مدیریت دقیق زمان آبیاری نیز باعث کاهش خسارت‌ها و افزایش کارایی می‌شود. از فواید دیگر این سیستم می‌توان به صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کاهش هدررفت آب، کاهش رواناب و فرسایش خاک، اشغال فضای کمتر با نصب تجهیزات

1. Chidambaranathan et al
2. De Pinto et al
3. Biabi et al
4. Azar et al
5. Nhamo et al
6. Tabatabaei et al
7. Gennaro et al

زیرزمینی و امکان نظارت از راه دور بر آبیاری باتوجه‌به شرایط محیطی اشاره کرد (ثابت و محمدپور، ۱۴۰۰). ادغام سیستم‌های آبیاری هوشمند در کشاورزی، مزایای قابل توجهی را ارائه کرده و مصرف کارآمد و منطقی آب را تضمین می‌کند؛ همچنین به کاهش بحران جهانی آب کمک می‌نماید. ترکیب هوشمند اینترنت اشیا، سنجش از راه دور و هوش مصنوعی روند رو به رشدی را در زمینه آبیاری هوشمند در سال‌های آینده ایجاد خواهد کرد (هاموچ و همکاران[1]، ۲۰۲۴). برنامه‌ریزی دقیق آبیاری با استفاده از حسگرها این پتانسیل را دارد که بازده مصرف آب را افزایش دهد و درعین‌حال استفاده از منابع را به حداکثر برساند. در تحقیقی در راستای کاهش تلاش‌های یک کشاورز، یک سیستم آبیاری قطره‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا توسعه داده شد و عملکرد سیستم مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم توسعه یافته، متشکل از حسگرها و میکروکنترلرها، پارامترهای ذهنی محیطی، یعنی میزان رطوبت خاک، دمای خاک، رطوبت نسبی و دما را ثبت می‌کند. برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از آستانه‌های بالا (ظرفیت زراعی) و آستانه پایین (۵۰ درصد آب در دسترس گیاه) برنامه‌ریزی شد. اطلاعات گرفته شده توسط حسگرها با استفاده از فناوری اینترنت اشیا به‌صورت بی‌سیم در سرور ابری آپلود می‌شود که از هر نقطه جهان قابل دسترسی است. در طی یک دوره ۳۱ روزه، صرفه‌جویی ۳۵ درصدی در مصرف آب در مقایسه با آبیاری قطره‌ای مبتنی بر تبخیر- تعرق (روش سنتی) مشاهده شد (سینگ و همکاران[2]، ۲۰۲۳).

تحقیق در زمینه "کاربرد حسگرها و تجهیزات هوشمند در کشاورزی مدرن" از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تغییرات اقلیمی و چالش‌های ناشی از آن به‌طور فزاینده‌ای امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی را تهدید می‌کند. باتوجه‌به افزایش جمعیت و نیاز مبرم به منابع غذایی، بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، به‌ویژه حسگرها، می‌تواند به مدیریت بهینه آب، خاک و سایر منابع کشاورزی کمک شایانی کند. این فناوری‌ها علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت تولیدات، امکان پیشگیری از خساراتی نظیر بیماری‌ها و یخ‌بندان را فراهم می‌آورند و در نهایت به کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری منتهی می‌شوند. همچنین، داده‌های حاصل از این حسگرها می‌توانند به کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های بهینه و مبتنی بر شواهد یاری رسانند که این امر در راستای تحقق کشاورزی پایدار و کارآمد ضروری است؛ بنابراین، تحقیق در این حوزه نه‌تنها پاسخ‌گوی نیازهای امروز است، بلکه راه را برای آینده‌ای بهتر در کشاورزی نوین هموار می‌سازد. این پژوهش باانگیزه یافتن راهکارهایی نوین و کارآمد در عرصه مدیریت آبیاری، به بررسی عمیق روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک و فنون پیشرفته اتوماسیون آبیاری و آبیاری هوشمند می‌پردازد. هدف غایی، کاوش در دانش روز و ارزیابی رویکردهای نوآورانه و مؤثری است که بتوانند ضمن بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای بهره‌وری، پاسخی شایسته به چالش‌های فنی پیچیده در این حوزه باشند. این مطالعه، با تمرکز بر یافتن راه‌حل‌های عملی و پایدار، می‌کوشد تا زمینه‌ای را برای توسعه کشاورزی هوشمند و سازگار با محیط‌زیست فراهم آورد.

روش پژوهش

در این بخش، یک مرور جامع بر انواع حسگرهای پرکاربرد در زمینه هوشمندسازی کشاورزی و مدیریت بهینه آبیاری ارائه می‌شود. این مرور شامل حسگرهای مختلفی است، از جمله حسگرهای بارش، دما، برگ، نور، باد، فشار هوا (بارومتر)، دمای خاک، رطوبت خاک، آب، برف و گیاه. مشخصات این حسگرها به طور مبسوط در جدول (۱) آورده شده است. علاوه بر این، تجهیزات راه‌حل‌گرا که شامل ابزارهای مدیریت آبیاری، سیستم‌های مانیتورینگ سرمازدگی، حفاظت از گیاهان، تجهیزات رشد و تغذیه، ردیابی عملکرد ماشین‌آلات کشاورزی و دستگاه‌های پایش محصولات می‌شود، به صورت کامل موردبررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، ویژگی‌ها و قابلیت‌های این تجهیزات نیز به تفصیل بررسی و تحلیل شده‌اند تا نقش آن‌ها در بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی و کاهش مصرف منابع به روشی علمی و دقیق تبیین شود. این رویکرد به ما امکان می‌دهد تا به درک بهتری از چگونگی ارتقاء کارایی و پایداری در سیستم‌های کشاورزی مدرن دست یابیم.

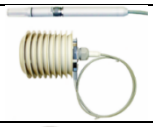
1. Hammouch et al
2. Sing et al

یافته‌های پژوهش

۱. حسگرها

حسگرها یا سنسور[1] ابزاری است که به محرک‌های فیزیکی خاص واکنش نشان می‌دهند و سیگنال‌های الکتریکی قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌کنند. این حسگرها می‌توانند از انواع مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی یا نوری باشند. در جدول (۱)، حسگرهای پرکاربرد در راستای هوشمند سازی کشاورزی و آبیاری ذکر شده‌اند. تولید حسگرهای ارزان و کم‌مصرف در چند سال گذشته، تحولی نوین در کشاورزی ایجاد کرده است. همچنین، دیجیتالی‌سازی عملیات کشاورزی نیازمند تعداد زیادی حسگر است. این حسگرها نقش حیاتی در جمع‌آوری داده‌های زمین‌کشاورزی ایفا می‌کنند که این داده‌ها برای تجزیه‌وتحلیل و اتخاذ تصمیمات به کار می‌روند. انواع حسگرها شامل حسگرهای اندازه‌گیری برداشت محصول، موجودی انبار، میزان آب و مواد مغذی موجود در خاک و دماسنج‌های مخصوص ریشه گیاه یا خاک هستند. استفاده از حسگرها امکان نظارت لحظه‌ای بر داده‌های هیدرولیکی، خودکارسازی نظارت و ارائه هشدار توسط پلتفرم‌های مربوطه را در صورت وقوع مسائل مانند نشتی یا مصرف بیش از حد آب فراهم می‌کند (توسن و همکاران، ۱۴۰۳). ممکن است تکنیک‌های گیاهی به نظارت حرفه‌ای نیاز داشته باشند، زیرا درک داده‌های ردیابی شده برای کشاورزان دشوار بوده و این امر قابلیت اطمینان آبیاری را کاهش می‌دهد؛ هنگامی‌که یک نرم‌افزار و یا یک رویه مبتنی بر یک مدل خوب کالیبره شده باشد، استفاده از آن‌ها برای کاربران ساده‌تر می‌شود. لذا با تغییر روش برنامه‌ریزی آبیاری سنتی (عمل کشاورز) به روش برنامه‌ریزی آبیاری بر پایه‌ی صرفه‌جویی در مصرف آب و پذیرش فناوری‌های نوین، نشان از پتانسیل فوق‌العاده‌ی دوبرابر کردن سطح زیر کشت و بهره‌وری با استفاده از آب آبیاری موجود را دارد (آسفا و تادس[2]، ۲۰۲۴). فونتِس و همکاران[3] (۲۰۲۴) از سنسور MLX90614 برای اندازه‌گیری دمای پوشش تاج و در نتیجه محاسبه شاخص تنش آبی محصول استفاده کردند. نتایج نشان داد که دماسنج مادون‌قرمز MLX90614 در شرایط آزمایشگاهی و تاکستان با میانگین مربعات خطای ریشه و میانگین خطای مطلق کمتر از یک درجه سانتی‌گراد، عملکرد خوبی را داشته است.

جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸a؛ خورسند و همکاران، ۱۳۹۸b؛ خورسند و همکاران[4]، ۲۰۱۹؛ خورسند و همکاران، ۲۰۲۰؛ و خورسند و همکاران، ۲۰۲۱)

و	اسم	توضیحات	شکل
بارش	باران‌سنج هوشمند	متشکل از یک آهنربا و سوئیچ نِی است که با مکانیک سوئیچینگ سریع، آب از دست نمی‌رود. دقت دستگاه با سطح ۲۰۰ سانتی‌متر مربع، ۰/۲ میلی‌متر و با سطح ۸۰ سانتی‌متر مربع، ۰/۵ میلی‌متر است. جهت جلوگیری از ورود پرندگان و افزایش دقت دستگاه، می‌توان از تاج سبز رنگ استفاده کرد.	
دما	هیگروکلیپ[5]	رطوبت نسبی و دما را بادقت و تکرارپذیری فوق‌العاده اندازه‌گیری کرده و یک تاریخچه جمع‌آوری داده و کالیبراسیون یکپارچه دارد. همچنین نقطه شبنم، کمبود فشار بخار[6] (VPD) و محاسبات دلتا T موجود است.	
	سنجش دمای هوا و رطوبت نسبی	دمای هوا و رطوبت نسبی را با از طریق آنالیز داده‌های دریافتی از حسگرهای مجازی مانند نقطه شبنم، VPD و دلتا T اندازه‌گیری می‌کند.	
	دمای حباب خشک و مرطوب	دو سنسور بسیار قابل‌اعتماد و آزمایش شده در یک محفظه ضد آب وجود دارد که یکی از آن‌ها با دستمال پنبه‌ای پوشیده شده و با آب خیس می‌شود.	

1. Sensor
2. Asefa and Tadesse
3. Fuentes et al
4. Khorsand et al
5. Hygroclip
6. Vapour Pressure Deficit

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
برگ	حسگر رطوبت برگ	سنسور رطوبت برگ با اندازه‌گیری رسانایی روی یک کاغذ صافی که بین دو الکترود فولاد ضدزنگ در یک محفظه شفاف نگه داشته می‌شود، کار می‌کند. استفاده از پلاستیک شفاف لوسیت به‌عنوان نگهدارنده، باعث کاهش گرم‌شدن سنسور در مواجهه با نور مستقیم خورشید می‌شود.	
	حسگر دمای برگ	یک سنسور دمای برگ بسیار دقیق است که دمای تابش شده در اطراف سطح برگ یا سایبان را اندازه‌گیری می‌کند.	
	حسگر دمای برگ از طریق مادون‌قرمز	با اندازه‌گیری مقدار انرژی مادون‌قرمز ساطع شده از جسم و میزان انتشار آن (بدون تماس)، می‌توان دمای جسم را تعیین کرد.	
نور	حسگر تابش فعال فتوسنتزی	تابش فعال فتوسنتزی[1] (PAR) معمولاً به‌عنوان چگالی شار فوتون فتوسنتزی[2] (PPFD) اندازه‌گیری می‌شود. دانشمندان گیاه‌شناسی، باغبانان، بوم‌شناسان و سایر دانشمندان محیط‌زیست از حسگرهای کوانتومی برای اندازه‌گیری دقیق این متغیر استفاده می‌کنند.	
	پیرانومتر[3]	برای اندازه‌گیری میدانی تشعشعات خورشیدی در مطالعات کشاورزی، هواشناسی و انرژی خورشیدی طراحی شده است. در روز روشن و بدون مانع، این نسل جدید پیرانومترها نتایج مطلوبی در مقایسه با پیرانومترهای معمول دارند.	
باد	حسگر باد التراسونیک[4]	یک سنسور باد صوتی دوبعدی است که به طور خاص برای کاربردهای کشاورزی، جنگل‌داری و تحقیقات زیست‌محیطی ساخته شده است. میانگین و حداکثر سرعت و جهت باد را در فاصله زمانی ۵ دقیقه محاسبه می‌کند.	
	سرعت‌سنج باد	یک بادسنج کم‌هزینه، طولانی‌مدت و دقیق برای هر نوع استفاده بوده که میانگین سرعت باد را در دوره زمانی مشخص محاسبه می‌کند.	
	مانیتورینگ[5] باد	برای اندازه‌گیری دقیق سرعت باد و سنسور یکپارچه جهت باد ساخته شده است که سرعت باد و جهت باد را به‌صورت هم‌زمان و ترکیبی از هر دو ثبت می‌کند.	
بارومتر	حسگر بارومتر[6]	این حسگر فشار مطلق هوا را در محل اندازه‌گیری می‌کند. این برای کاربرد در زمینه حفاظت از محیط‌زیست طراحی شده است، جایی که دقت بالا، پاسخ سریع، پایداری طولانی‌مدت و قابلیت اطمینان موردنیاز است.	

1. Photosynthetically Active Radiation
2. Photosynthetic Photon Flux Density
3. Pyranometer
4. Ultrasonic
5. Monitoring
6. Barometer

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
رطوبت خاک	حسگر رطوبت‌سنج خاک	طول این حسگر ۱۰ سانتی‌متر بوده و دارای نفوذ بیشتری است. محتوای حجمی آب را با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک خاک با استفاده از فناوری خازن و دمای خاک تعیین می‌کند.	
	پراب پروفیل[1]	برای محصولات ردیفی مانند ذرت، پنبه، یونجه و سویا و همچنین تمام محصولات دائمی گزینه بهتری است. سنسور و کابل در زیر سطح ترانشه جای‌گذاری شده و نیازی به نصب سالانه سنسورهای خاک در مزرعه نیست. این سنسور میزان حجمی آب و دمای خاک را در پروفیل اندازه‌گیری می‌کند.	
	حسگر Drill and Drop	انعطاف‌پذیری زیادی را برای نظارت دقیق دما، میزان آب و شوری خاک در اعماق چندگانه در پروفایل خاک به کاربر ارائه می‌دهد.	
	حسگر رطوبت خاک واترمارک[2]	شامل دو الکترود متحدالمرکز است که در یک ماده ماتریس ویژه کارگذاری شده و توسط یک غشای مصنوعی در جای خود نگه داشته می‌شود. ماده ماتریس برای منعکس‌کردن حداکثر تغییر مقاومت الکتریکی در محدوده رشد محصول و همچنین خنثی‌کردن اثر شوری خاک انتخاب شده است. در عملیات، رطوبت خاک به طور مداوم جذب یا آزاد می‌شود و مقاومت الکتریکی بین الکترودها تغییر می‌کند. این مقاومت توسط ایستگاه هواشناسی خوانده و ثبت می‌شود.	
	تانسیومتر[3]	مکش آب خاک را اندازه‌گیری می‌کند. این مقدار نشان‌دهنده انرژی است که سیستم ریشه گیاه برای برداشت آب از خاک استفاده می‌کند. به کاربر کمک می‌کند تا تصمیمات برنامه‌ریزی آبیاری را آگاهانه اتخاذ کند و در نتیجه کمیت و کیفیت عملکرد را بهبود بخشد و درعین‌حال هزینه‌های آب، کود، نیروی کار و انرژی را کاهش دهد.	
دمای خاک	حسگر دمای خاک	یک سنسور دقیق در محفظه فولادی ضد آب است.	
	حسگر دمای خاک چندگانه	اندازه‌گیری دمای خاک را از چند سانتی‌متر تا عمق ۱۵ متر را فراهم می‌کند. فاصله بین سنسورها را می‌توان باتوجه‌به کاربرد انتخاب کرد (حداکثر ۱۰ سنسور).	

1. Probe Profile
2. Watermark
3. Tensiometer

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
آب	جعبه رابط EC و pH	یک دستگاه اندازه‌گیری با صفحه‌نمایش در جعبه ضد آب است که می‌تواند برای اندازه‌گیری مداوم EC و pH استفاده شود. با استفاده از حالت کالیبراسیون داخلی، تمام قرائت‌های سنسور را می‌توان هر از گاهی کالیبره و بررسی کرد.	
	حسگر EC	از یک سنسور قابل‌اعتماد و قوی برای اندازه‌گیری رسانایی و یک ترمومتر برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌کند. این سنسور برای نظارت بر آب و محیطزیست، در کشاورزی و صنعتی ایده‌آل است.	
	حسگر pH	برای اندازه‌گیری مقدار pH محلول‌های مختلف آبی است.	
	حسگر تغییر فشار	سوئیچ فشار برای استفاده با هوای فشرده، روغن هیدرولیک، امولسیون روغن و آب مناسب است. آستانه تشخیص یک‌بار و خاموشی ۰/۵ بار است. هدف اصلی این سنسور کنترل و یا بررسی عملکرد سیستم آبیاری است.	
	رابط کنتور آب	این رابطها که در اکثر کنتورهای آبی مورداستفاده قرار می‌گیرند در مدیریت آبیاری، مشاوره آبیاری، آبیاری هوشمند، کنترل‌پذیری آبیاری، حسابداری آب و به‌طورکلی و گسترده در محصولات زراعی باز، هیدروپونیک و گلخانه استفاده می‌شود.	
	فشارسنج لوله	امکان نظارت مداوم بر فشار در لوله‌های آبیاری را فراهم می‌کند، بنابراین می‌توان از آن در انواع سیستم‌های آبیاری مدرن استفاده کرد.	
	حسگر سطح آب	یک سنسور سطح آب دقیق و مقرون‌به‌صرفه دارای یک ماژول حسگر بارومتریک یکپارچه برای افزایش دقت است که برای اندازه‌گیری عمق یا سطح در چاه‌ها و آب‌های آزاد (رودخانه‌ها و دریاچه‌ها) مورداستفاده قرار می‌گیرد.	
برف	حسگر التراسونیک	برای اندازه‌گیری بدون تماس عمق برف و سطح رودخانه (عمق آب) در شرایط آب‌وهوایی بسیار سرد استفاده می‌شود.	
گیاه	دندرومتر[1]	ابزاری مقرون‌به‌صرفه و مفید برای مطالعات اکوفیزیولوژیکی بوده و برای اندازه‌گیری مداوم رشد گیاه (تغییر قطر گیاه) به کار می‌روند و به کاربر اجازه می‌دهد تا پارامترهای گیاه را با استفاده از فاصله زمانی مشابه ثبت کند.	

۲. تجهیزات راه‌حل گرا

تجهیزات مدیریت آبیاری

حسگر نامرئی برای مدیریت آبیاری و تنش آبی: این حسگر قادر است همه مسائل بالقوه و رویدادهای استرس‌زا را پیش از وقوع یا قابل مشاهده‌شدن شناسایی کند. این دستگاه که شامل ضروری‌ترین حسگرها برای مدیریت آبیاری و تنش آبی است، دمای خاک و محتوای حجمی آب را تقریباً در زمان واقعی اندازه‌گیری می‌کند. مطابق با شکل (۱)، نصب این دستگاه می‌تواند به‌طور کامل در زیر زمین (نامرئی) باشد که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای زمین‌های گلف، پارک‌ها، خانه‌ها، باغ‌ها و مزارع تبدیل می‌کند. این دستگاه با یک باتری که بین ۶ تا ۱۲ ماه عمر می‌کند، تغذیه می‌شود و می‌تواند در برنامه‌ریزی آبیاری و شناسایی نقاط استرس احتمالی کمک کند. این سیستم با بهره‌گیری از حسگرهایی که به طور مداوم رطوبت و دمای خاک را در هر مکان اندازه‌گیری می‌کنند، راهکاری

1. Dendrometer

نوین در مدیریت منابع ارائه می‌دهد. طراحی نامرئی این حسگرها، ضمن حفظ زیبایی محیط (مانند زمین‌های گلف و پارک‌ها)، هیچ‌گونه مزاحمتی برای کارگران ایجاد نمی‌کند. باتوجه‌به استفاده از باتری با عمر طولانی (۶ تا ۱۲ ماه)، نیاز به پنل خورشیدی مرتفع شده و سیستم به طور قابل توجهی مقرون به‌صرفه و بادوام خواهد بود. این ویژگی‌ها در کنار کاهش خطر خرابکاری و سرقت احتمالی، این سیستم را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای مختلف تبدیل می‌کند.

شکل ۱. نمونه‌هایی از حسگرهای نامرئی دفن شده در زیرِ زمین

دستگاه مدیریت آب برای آینده‌ی پایدار کشاورزی: این دستگاه اینترنت اشیا (IoT) برای نظارت بر عمق سطح آب در مزارع برنج و بسیاری از کاربردهای دیگر در زمان واقعی طراحی شده است. مطابق شکل (۲) این دستگاه به کشاورزان کمک می‌کند تا با استفاده از روش‌های مرطوب و خشک‌کردن و سایر تکنیک‌های صرفه‌جویی در آب، در زمان و هزینه صرفه‌جویی کنند و استفاده از آب را بهینه کنند. این امر می‌تواند به کاهش پتانسیل گرمایش جهانی از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (متان) و درعین‌حال حفظ ریشه‌های سالم‌تر کمک کند. این دستگاه همچنین دارای قابلیت ذخیره‌سازی و اشتراک‌گذاری خودکار داده‌ها است که مدیریت دانش بهتر را در سطح جامعه تسهیل می‌کند.

شکل ۲. نمونه‌ای از دستگاه مدیریت آب در مزراع پر آب‌بر مانند شالیزارها

دستگاه اندازه‌گیری ارتفاع برف یا سطح آب: این دستگاه با استفاده از یک حسگر سطح اولتراسونیک، یک راه‌حل مقرون‌به‌صرفه و دارای سیستم هشدار اولیه برای اندازه‌گیری غیرتماسی ارتفاع برف یا سطح آب در شرایط سخت ارائه می‌دهد. شکل (۳) نمایی از این دستگاه است. با قابلیت اطمینان بالا، مصرف انرژی کم، نصب سریع و هزینه نگهداری پایین، این دستگاه امکان نظارت و جمع‌آوری داده‌ها در مناطق حساس را فراهم می‌کند که می‌تواند به محافظت از مردم و جلوگیری از آسیب‌های جدی کمک کند و درعین‌حال سهولت استفاده را نیز تضمین می‌کند.

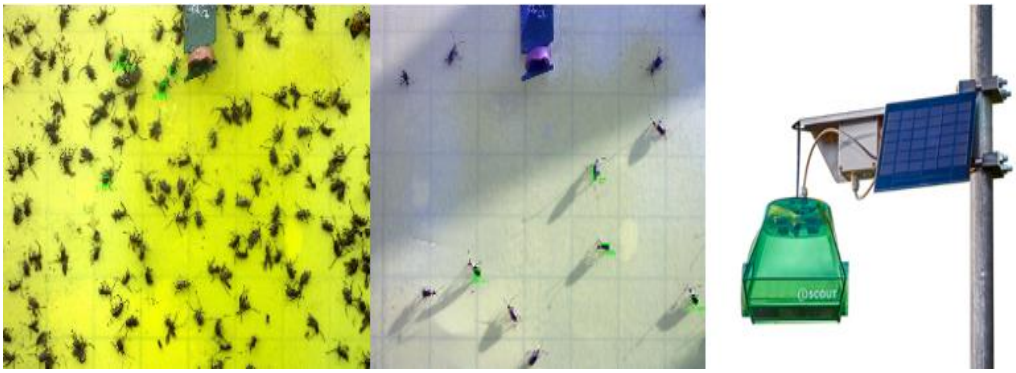
شکل ۳. نمونه‌ای از دستگاه نصب شده در بالای سطح رودخانه و ایستگاه هواشناسی

دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی: تغییر اقلیم به وقوع یخ‌بندان بهاره که هم‌زمان با گلدهی گیاهان اتفاق می‌افتد، تأکید دارد و هر ساله خسارات زیادی در تولید محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند. سرمازدگی بهاره می‌تواند تجربه‌ای ویرانگر برای کشاورزان باشد؛ چرا که نه‌تنها به گیاهان و محصولات آسیب می‌زند، بلکه امکان دارد آن‌ها را کاملاً از بین ببرد. این مسئله منجر به اتلاف بسیاری از کارها، زمان و تلاش کشاورزان در کاشت و پرورش مزارع می‌شود و در بدترین حالت ممکن، ضرر مالی شدیدی به آن‌ها وارد می‌آورد. دستگاهی که در شکل (۴) نمایش داده شده، امکان دسترسی مداوم از راه دور را به کشاورزان می‌دهد تا بتوانند مزرعه خود را در زمان واقعی تحت کنترل قرار دهند. دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی با استفاده از سنسورهای خاص، امکان اندازه‌گیری دقیق دمای حباب مرطوب و خشک را فراهم می‌کند. این دستگاه در صورت وقوع یخ‌بندان، از طریق پیامک، صدا و ایمیل هشدارهای لازم را به کشاورزان ارسال می‌کند و زمان دقیق در معرض خطر قرار گرفتن محصولات را نیز اطلاع‌رسانی می‌کند. همچنین، این دستگاه قابلیت تعیین میزان تاثیرگذاری ابزارهای کاهش یخ‌بندان را دارد و در صورت نیاز، تنظیمات لازم برای بهبود کارایی را پیشنهاد می‌دهد.

شکل ٤. نمونه‌ای از دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی

۳. حفاظت از گیاهان، رشد و تغذیه

کنترل کامل ساکنان مزرعه: مهندسان باهدف کمک به کشاورزان در رشد محصولات به بهینه‌ترین و سالم‌ترین شکل، یک سیستم دوربین اپتیکال با وضوح‌بالا به همراه نرم‌افزار بینایی کامپیوتری طراحی کرده‌اند که قادر به شناسایی حشرات از روی تصاویر است. این سیستم شامل یک تله حشرات با تجهیزات الکترونیکی یکپارچه، شامل دوربین، مودم، منبع تغذیه با پنل خورشیدی و صفحه چسبنده است. دوربین نوری با وضوح‌بالا درون این تله نصب شده است تا بتواند وجود حشرات را از راه دور در مزارع نظارت کند. لازم به ذکر هست که انواع مختلفی از تله‌ها برای پوشش طیف وسیعی از گونه‌های حشرات، توسعه داده شده است. شکل (۵) نمونه‌ای از این دستگاه است.



شکل ۵. نمونه‌ای از دستگاه پایش و شناسایی حشرات

واسنجی سم‌پاش و مدیریت پاشش: این ابزار با کاربری آسان، به کشاورزان کمک می‌کند تا راندمان پاشش را بر روی سطوح طبیعی گیاه اندازه‌گیری کنند. این ابزار با استفاده از جعبه مخصوص (LeafLab)، مایع UV (UView) و نرم‌افزار DropSight، امکان اتخاذ تصمیمات آگاهانه‌تر بر اساس اندازه‌گیری‌های کمی مواد اسپری شده را فراهم می‌کند. این امر منجر به کاهش خطراتی مانند نتایج ضعیف کنترل بیولوژیکی به دلیل راه‌اندازی ضعیف سم‌پاش و نشست مواد اسپری شده، سطوح باقیمانده غیرقابل‌قبول ناشی از تجمع و روان‌شدن حجم زیاد یا قطرات بزرگ، تلفات شیمیایی ناشی از ترشحات پاشش بیش از حد و آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به دلیل حجم زیاد پاشش می‌شود. در نهایت، استفاده از این ابزار به بهینه‌سازی مقدار استفاده از فرمولاسیون‌های شیمیایی، به‌حداقل‌رساندن ازدست‌دادن محصول، توسعه مقاومت بالقوه، بهینه‌سازی انتخاب و استفاده از مواد کمکی و افزودنی‌ها برای بهبود کارایی پاشش و طراحی مناسب برای بهینه‌سازی عملکرد سم‌پاش کمک می‌کند. شکل (۶) تصاویری از این دستگاه را نشان می دهد.

شکل ٦. دستگاه، نرم‌افزار و نمونه‌ی پایش شده‌ی میزان محلول پاششی

کنترل از راه دور: شرایط مزرعه، شرایط محصول و رشد میوه به‌وسیله یک سیستم دوربین نوری پیشرفته که توسط نرم‌افزار هوش مصنوعی پشتیبانی می‌شود، به‌طور کامل از راه دور تحت کنترل قرار می‌گیرد که در شکل (۷) نشان‌داده‌شده است. جهت کمک به کشاورزان برای رشد محصولات به بهینه‌ترین و سالم‌ترین روش، یک سیستم دوربین اپتیکال با وضوح‌بالا به همراه نرم‌افزار بینایی کامپیوتری طراحی شده است که قادر به تشخیص اشیا از روی تصاویر است. این سیستم به کشاورزان این امکان را می‌دهد تا به‌طور دقیق و مؤثری بر وضعیت محصولات و شرایط محیطی نظارت کنند. استفاده از این فناوری می‌تواند به کشاورزان در شناسایی مشکلات زودهنگام، مدیریت کارآمدتر منابع و بهبود عملکرد کلی مزرعه کمک کند.

شکل ۷. نمونه‌ای از دستگاه پایش محصول و کاربرد آن در باغات و مزارع

پیشبرد نظارت بر سلامت و تغذیه گیاهی: این فناوری یک حسگر گیره برگ است که قادر به اندازه‌گیری نیتروژن و کلروفیل به‌طور غیرمخرب است. شکل (۸) نمونه‌ای از این حسگر است. این حسگر محتوای کلروفیل و شاخص‌های پلی‌فنلی برگ‌های گیاه را نیز تحت بررسی قرار می‌دهد. این حسگر نوری امکان اندازه‌گیری آسان، سریع و غیرمخرب کلروفیل، فلاونول‌ها و آنتوسیانین‌ها را در برگ‌ها فراهم می‌کند. فلاونول‌ها به‌ویژه پس از قرارگیری در معرض نور، فرآیند سنتز را آغاز می‌کنند و به‌این‌ترتیب نشان‌دهنده خوبی از تعامل گیاه با نور هستند. فلاونول‌ها و آنتوسیانین‌ها به گروه پلی‌فنول‌ها تعلق دارند که برای سلامت انسان شناخته شده‌اند. این ترکیبات دارای خواص آنتی‌اکسیدانی هستند و به کاهش آسیب‌های سلولی و التهاب‌ها کمک می‌کنند. از سوی دیگر، آنتوسیانین‌ها نیز در سلامت قلب و عروق مؤثرند، اثرات ضدالتهابی دارند و به‌واسطه‌ی مزایای آنتی‌اکسیدانی بیشتر، در تقویت سیستم ایمنی بدن نقش ایفا می‌کنند. این دستگاه با تجزیه‌وتحلیل و غربالگری فلاونول‌ها و آنتوسیانین‌ها بر اساس فلورسانس کلروفیل اقدام به اندازه‌گیری این ترکیبات می‌کند. سیستم اندازه‌گیری هوشمند این دستگاه با بهره‌گیری از طول‌موج‌های مختلف نور، به تحریک کلروفیل پرداخته و فلورسانس آن را اندازه‌گیری کرده و در نهایت نتایج را محاسبه می‌نماید.

شکل ۸. نمونه‌ای از دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه

تعیین نیازهای کودی با استفاده یک بازتاب‌سنج قابل‌حمل: تأمین نیتروژن بهینه برای محصولات زراعی، یکی از حیاتی‌ترین تصمیمات در کشاورزی است. این دستگاه یک حسگر دستی و قابل حمل است که به تسهیل تصمیم‌گیری در خصوص کودی کمک می‌کند. شکل (۹) یک نمونه از این حسگر است. این حسگر وضعیت تغذیه نیتروژن محصولات را با ارزیابی محتوای کلروفیل گیاهان و مقدار زیست‌توده آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند. اندازه‌گیری‌ها در حین حرکت در مزرعه طی ۲۰ ثانیه انجام می‌شود. علاوه بر این، اندازه‌گیری شاخص پوشش گیاهی اطلاعاتی درباره توسعه محصول و جذب نیتروژن فراهم می‌آورد. در فرآیند توصیه کودی، این دستگاه به پارامترهایی نظیر تنوع محصول، بازده موردانتظار، مرحله رشد محصولات و محتوای پروتئین دانه توجه می‌کند. ویژگی‌های این دستگاه عبارت‌اند از تشخیص سریع، قابل‌اعتماد و مقرون‌به‌صرفه، ارائه توصیه‌های مستقیم و کاربردی در زمینه کاربرد نیتروژن، امکان کنترل و بهینه‌سازی عملکرد و محتوای پروتئین.

شکل ۹. نمونه‌ای از دستگاه بازتاب‌سنج و نحوه عملکرد آن

۴. ردیابی کار ماشین‌آلات

این سیستم قابلیت ردیابی و کنترل کامل ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی، از جمله تراکتورها، دروگرها، سم‌پاش‌ها و ماشین‌های چمن‌زنی را به‌صورت راه دور فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها به حداکثر رساندن کارآیی نیروی کار کمک کرده و شفافیت کاملی در زمینه ردیابی ماشین‌آلات ایجاد می‌کند. این دستگاه که در شکل (۱۰) نشان‌داده‌شده است، به‌راحتی بر روی تراکتور یا هر وسیله نقلیه دیگری نصب می‌شود و فرایندهایی را به‌صورت خودکار انجام می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، بااطلاع از اینکه سم‌پاشی با سرعت مناسب انجام شده یا تعمیر و نگهداری به‌موقع صورت‌گرفته است، می‌توان بهره‌وری عملیات زراعی را افزایش داد. ماشین‌آلات کشاورزی به‌خودی‌خود پیچیده هستند و این دستگاه مواردی نظیر سطوح بهره‌وری، قابلیت ردیابی، ایمنی عملیات، استفاده روزانه کارآمد از دستگاه و هزینه سوخت را در نظر می‌گیرد و به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.

شکل ۱۰. نمونه ردیاب ماشین‌آلات

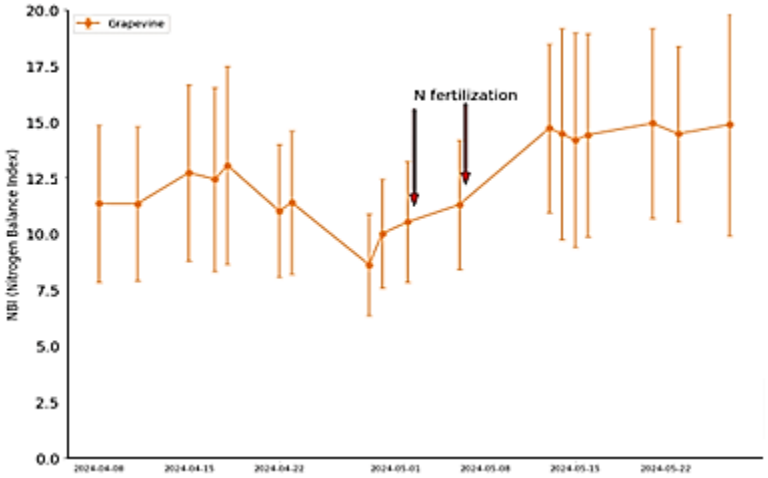
۵. دستگاه پایش محصولات

این دستگاه که در شکل (۱۱) نشان‌داده‌شده است، به‌طور مداوم دما، رطوبت و سطوح CO_2 را در زمان واقعی در محل نگهداری محصولات ردیابی می‌کند. با پایش داده‌های ذخیره‌شده، این دستگاه به جلوگیری از تلفات محصولات موجود در انبار در هر فصل کمک می‌کند. به‌طور معمول، برای جمع‌آوری داده‌ها، دستگاه به مدت ۳ الی ۵ بار در میان محصولات انبار قرار داده می‌شود. داده‌ها و گزارش‌ها به‌صورت آنی و با اتصال به سایر دستگاه‌ها قابل دسترسی هستند. این دستگاه به‌عنوان یک ابزار اساسی در مدیریت ذخیره‌سازی محصولات استفاده می‌شود. این دستگاه مزایای متعددی دارد. اولاً، با شناسایی شرایط موجود به کاربر این امکان را می‌دهد که قبل از وقوع آسیب یا پوسیدگی، اقدامات لازم را انجام دهد. دوماً، به تنظیم دقیق شرایط محیطی داخل واحد ذخیره‌سازی کمک می‌کند که در نتیجه نگهداری، تحویل بهتری از محصول حاصل گردد. سوماً، در صورت شناسایی محصولی با شرایط نامناسب، هشدار صادر کرده و به جلوگیری از تلفات کمک می‌کند. در نهایت، با جلوگیری از تلفات محصولات، از ضرر مالی ناشی از کاهش کیفیت و مقدار محصول جلوگیری می‌نماید و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

شکل ۱۱. نمونه‌ای از دستگاه پایش محصول

در ادامه به چند نمونه از کارکرد برخی از تجهیزات فوق پرداخته می‌شود (وب‌سایت متوس[1]):

دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه، یک سنسور غیرمخرب گیره مانند برگ است که سنجش‌های ارزشمندی را از طریق اندازه‌گیری شاخص تعادل نیتروژن (NBI)[2] ارائه می‌دهد. NBI به کشاورزان کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورداستفاده از نیتروژن بگیرند، به‌ویژه در سایبان‌های عمودی مانند تاکستان‌ها، باغ‌ها، محصولات فشرده؛ مانند سبزی‌ها و توت‌ها و همچنین می‌تواند در محصولات زراعی مانند گندم، سیب‌زمینی و یا سویا استفاده شود. با استفاده از NBI، کشاورزان می‌توانند از کوددهی بیشتر یا کمتر جلوگیری کنند که این امر منجر به کاهش آبشویی و تبخیر نیتروژن، صرفه‌جویی در هزینه و تغذیه بهینه محصول برای بهبود عملکرد و کیفیت می‌شود. دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه می‌تواند توسط هر شخصی که با گیاهان سروکار دارد، در داخل یا خارج از خانه مورداستفاده قرار گیرد. به‌عنوان یک مثال در یک آزمایش انگور گلدانی در اتریش، سطح نیتروژن انگور نزدیک به دو ماه، از آوریل تا اوایل ژوئن ۲۰۲۴ اندازه‌گیری شد و میزان اثربخشی نظارت NBI به وضوح نمایان گردید که در شکل (۱۲) آورده شده است. شاخص NBI از حدود ۱۱ شروع شد و به‌تدریج به دلیل حرکت طبیعی نیتروژن از خاک با افزایش دما افزایش یافت. بااین‌حال، در عرض دو هفته، NBI به طور قابل توجه کاهش یافت و به مقدار ۸ رسید؛ زیرا تقاضای نیتروژن گیاه در طول فاز رشد افزایش یافته آن در بهار، بیش از عرضه بود. در این مرحله، انگور به مرحله گلدهی خود نزدیک می‌شد، جایی‌که مقدار NBI حداقل ۱۱ برای رشد بهینه توصیه می‌شود (سرویک و همکاران[3]، ۲۰۱۵).



شکل ۱۲. پایش شاخص تعادل نیتروژن (NBI) در یک تاک گلدانی با استفاده از دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه

دمای نقطه شبنم دمایی است که در آن بخار آب موجود در هوا متراکم می‌شود و قطرات مایعی را تشکیل می‌دهد و هوا در آن لحظه خنک می‌شود؛ بنابراین، هنگامی‌که دمای نقطه شبنم برابر با دمای هوا باشد، رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد است. با ادامه افزایش دمای هوا از دمای نقطه شبنم، مقادیر رطوبت نسبی کمتر می‌شود؛ درحالی‌که وقتی دمای هوا به سمت نقطه شبنم سرد می‌شود،

1. Metos.global
2. Nitrogen Balance Index
3. Cerovic et al

رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. دمای نقطه شبنم می‌تواند برای پیش‌بینی زمان وقوع یخ‌بندان تابشی استفاده شود. به‌عنوان‌مثال، اگر آسمان صاف باشد، بادها ملایم باشند و دمای هوا در ساعت ۶ بعد از ظهر، ۸ درجه سانتی‌گراد باشد، اما نقطه شبنم ۲- درجه سانتی‌گراد باشد، در این صورت احتمال یخ‌بندان در شب یا اوایل صبح روز بعد وجود دارد. نقاط شبنم بالا را می‌توان به‌عنوان پیش‌بینی آب و هوای شدید استفاده کرد. هر چه نقطه شبنم بالاتر باشد، رطوبت هوا برای توسعه شدید آب‌وهوا بیشتر است. اگر نقاط شبنم زیر ۱۳ درجه سانتی‌گراد باشد، شرایط عموماً پایدار است، دما بین ۱۳ درجه سانتی‌گراد تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد آنگاه نیمه مرطوب و نیمه ناپایدار، ۱۸ درجه سانتی‌گراد تا ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد آنگاه غیرمرطوب و بالاتر از ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد آنگاه بسیار مرطوب و بسیار ناپایدار می‌شود. چندین عامل دیگر برای آب و هوای شدید موردنیاز است، اما دمای نقطه شبنم یک عامل مهم است. دانستن سطح رطوبت خاک از منظر هزینه و عملکرد در محصولات دیم و آبی بسیار مهم است؛ زیرا مقدار مواد مغذی مصرفی نیازمند برآورده کردن سطوح رطوبتی خاک دارد. به‌عنوان‌مثال اگر ۲۵۰ میلی‌متر کوددهی کنید، درحالی‌که ۳۰۰ میلی‌متر کمبود رطوبت خاک وجود دارد، پتانسیل عملکرد را از دست خواهید داد.

تنوع آب‌وهوا همچنان یک چالش بزرگ برای کشاورزی مدرن است و همه چیز از جوانه‌زنی بذر تا برداشت را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. از طریق این مجموعه چهارقسمتی، روابط پیچیده بین پارامترهای آب‌وهوا و موفقیت کشاورزی موردبررسی قرار می‌گیرد. درک تنوع بارندگی به کشاورزان کمک می‌کند تا پتانسیل عملکرد را پیش‌بینی کنند و تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد آبیاری و کاربردهای مواد مغذی بگیرند. نظارت بر دما امکان کنترل دقیق تبخیر و تعرق، خطر یخ‌بندان و راندمان سم‌پاشی را فراهم می‌کند که منجر به بهبود اثربخشی آفت‌کش‌ها و حفاظت از محصولات می‌گردد. شرایط رطوبت و باد نقش مهمی در توسعه بیماری، خطرات اسکان و فرآیندهای خشک‌کردن ایفا می‌کند و نیاز به داده‌های میدانی فوری را برجسته می‌کند. در نهایت، تابش خورشیدی و رطوبت خاک مستقیماً بر رشد محصول و جذب مواد مغذی تأثیر گذاشته و نشان می‌دهند که تعادل مناسب میان آب و نور خورشید برای به حداکثر رساندن پتانسیل عملکرد ضروری است.

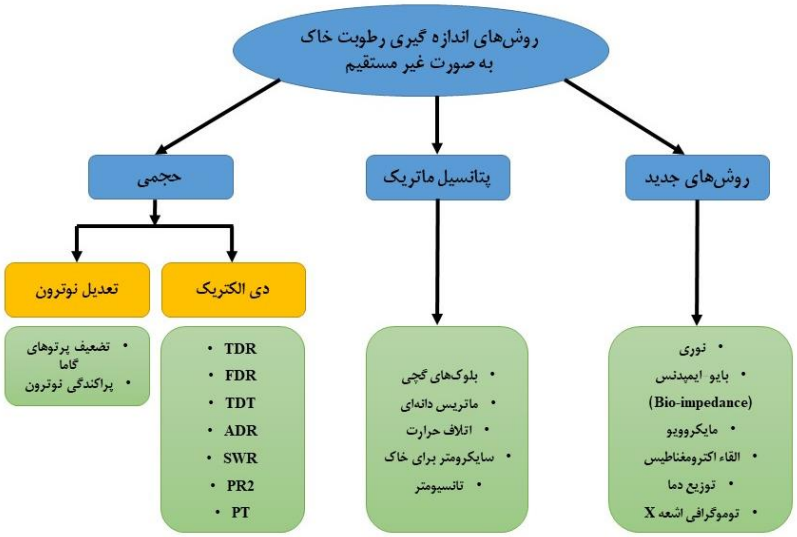
۶. مدیریت آب (سنجش رطوبت خاک)

آگاهی از زمان مناسب برای شروع و توقف آبیاری، به حفاظت از یکی از بزرگ‌ترین منابع کره زمین، یعنی آب، کمک می‌کند. سنجش دقیق رطوبت خاک موجب می‌گردد سیستم آبیاری در زمان درست اجرا شود تا از اتلاف آب و شستشوی کود جلوگیری شود. این مدیریت نه‌تنها منجر به استفاده بهینه از آب و کود می‌شود بلکه می‌تواند بازده تولید را افزایش دهد. مدیریت صحیح آبیاری مزایای متعددی دارد. این مدیریت منجر به ذخیره آب از طریق استفاده بهینه و کاهش هدررفت آن می‌شود. همچنین، با استفاده کمتر از منابع، عملکرد و میزان تولید افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کیفیت محصولات به واسطه تأمین نیازهای واقعی گیاه بهبود می‌یابد. فرایند شستشوی کود کاهش‌یافته و مصرف آن بهینه می‌شود. در نهایت، با تأمین رطوبت مناسب، سلامت و رشد گیاهان افزایش می‌یابد. یکی از راه‌های افزایش کارایی مدیریت آبیاری، تعیین رطوبت خاک[1] است که معمولاً به‌صورت نسبت بین جرم آب در نمونه خاک و جرم خشک آن یعنی رطوبت وزنی خاک[2] یا بر حسب حجم آب در خاک به حجم معینی از خاک خشک یعنی رطوبت حجمی خاک[3] بیان می‌شود؛ بااین‌حال، روش‌های وزنی برای تعیین رطوبت خاک معمولاً مخرب، غیرقابل‌تکرار و زمان‌بر هستند. به همین دلیل، روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی خاک مانند نفوذپذیری یا گذردهی دی‌الکتریک خاک[4]، ظرفیت حرارتی یا محتوای H^+ به‌عنوان جایگزین‌هایی مناسب در نظر گرفته می‌شوند (کلارک تاپ و فری[5]، ۲۰۱۸). در این راستا، هاردی[6] (۲۰۲۰) بررسی جدیدی درباره حسگرهای رطوبت خاک برای استفاده در کشاورزی انجام داده است. در سه دهه گذشته، حسگرهای متنوعی با استفاده از اصول فیزیکی مختلف، طراحی‌های الکترونیکی و ساختارهای متنوع توسعه یافته و در دسترس بخش آبیاری قرار گرفته است. این حسگرها به کشاورزان کمک می‌کنند تا رطوبت خاک را به‌طور دقیق و کارآمد برای بهینه‌سازی آبیاری مدیریت کنند و به

1. Soil water content
2. Gravimetric water content
3.Volumetric soil water content
4. Soil dielectric permittivity
5. Clarke Topp and Ferré
6. Hardie

این ترتیب، منابع آب را بهتر حفظ کنند (لکشمی و همکاران[1]، ۲۰۱۴؛ ورا و همکاران[2]، ۲۰۱۷).

درک مقادیر رطوبت خاک در منطقه‌ی پویای ریشه، امکان تعریف یک الگوی فصل رشد محصول و خاک را فراهم می‌کند، اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در زمین، همراه با داده‌های پیش‌بینی شده درباره تبخیر و تعرق، بینشی به مصرف آب در آینده ارائه می‌دهند. رطوبت خاک نقش بسزایی در تشخیص تنش آبی و مدیریت آبیاری دارد. بااین‌حال، تخمین دقیق رطوبت خاک از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی می‌تواند بسیار گران باشد، زیرا نیاز به فرآیند نمونه‌برداری تکراری برای ارزیابی تغییرات دوره‌ای در رطوبت خاک دارد. باتوجه‌به اینکه رطوبت خاک از نظر زمانی و مکانی بسیار پویا است، ضروری است که به‌طور مستمر نظارت و پایش شود. روش‌های مختلفی برای تعیین وضعیت رطوبت خاک وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در شکل (۱۳) خلاصه کرد. این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند و باید بااحتیاط و متناسب با نیاز و تقاضای پروژه انتخاب شوند (شارما و همکاران[3]، ۲۰۱۸). روش وزنی یا حجمی دقت بالایی دارند، اما سطح دقت به‌دقت توزین بستگی دارد، اگرچه این خطاها در مقایسه با تنوع خاک در مزرعه ناچیز است، این تکنیک بسیار دقیق است، اما نکاتی وجود دارد. این روش‌ها بیشتر به‌عنوان یک ابزار راهنما مورداستفاده قرار می‌گیرند (لی و همکاران[4]، ۲۰۱۸). در جدول ۲، حسگرهای اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت حجمی و مزایا و معایب هر یک معرفی شده‌اند. این حسگرها می‌توانند به طور هم‌زمان به پایش مداوم و دقیق رطوبت خاک کمک کنند و با ارائه داده‌های به‌روز، مدیریت آبیاری را تسهیل نمایند.



شکل ۱۳. روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک به‌صورت غیرمستقیم

1. Lekshmi et al
2. Vera et al
3. Sharma et al
4. Li et al

جدول ۲. مزایا و معایب حسگرهای اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت حجمی (خورسند و همکاران، ۲۰۱۹، خورسند و همکاران، ۲۰۲۰، خورسند و همکاران، ۲۰۲۱، ورا و همکاران[1]، ۲۰۲۱، جمال و همکاران[2]، ۲۰۲٤)

نوع حسگرها	مزایا	معایب
TDR	• مستقل از دما و محتوای نمک بافت خاک • تکرارپذیری، سرعت و دقت نسبتاً زیاد • اندازه‌گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک	• حجم حسگر کوچک • نیاز به واسنجی خاص خاک • هزینه بالا
FDR	• قابلیت تعیین رطوبت خاک در هر عمق ارائه رطوبت دقیق خاک	• اندازه حسگر کوچک • برای نتایج دقیق نیاز به تماس کامل با خاک دارد
TDT	• دقت بالا با دامنه بزرگ • قیمت مناسب به دلیل مدارهای استاندارد	• نیاز به نصب دائمی به دلیل دست‌خوردگی خاک در حین نصب
ADR	• قیمت مناسب به دلیل مدارهای استاندارد • دقت بالا با واسنجی مناسب	• حجم حسگر کوچک • نیاز به واسنجی خاص خاک • اندازه‌گیری‌ها تحت‌تأثیر خلأ هوا و سنگ‌ها قرار می‌گیرد.
SWR	• هزینه پایین‌تر نسبت به حسگرهای دیگر • قابلیت فنی بالا	• دقت اندازه‌گیری کمتری دارد • قابلیت تعویض حسگر محدود است • تحت‌تأثیر تغییرات در امپدانس پروب و ثابت دی‌الکتریک خاک
PT	• هزینه پایین • دقیق با مقیاس بزرگ • دقت بالا با واسنجی خاص خاک	• نیاز به نصب دائم • نیاز به واسنجی خاص خاک
PR2	• دقت اندازه‌گیری ۴ درصد • حمل‌ونقل آسان • مناسب برای انواع خاک‌ها قابل‌استفاده در انواع خاک‌ها • قابلیت اندازه‌گیری و قرائت سریع و هم‌زمان رطوبت در اعماق مختلف خاک • تکرار سریع قرائت‌ها و امکان برنامه‌ریزی آبیاری • قابلیت نصب به‌عنوان بخشی از سیستم آبیاری خودکار	• قیمت بالا • نصب لوله‌های شفاف پلاستیکی دشوار است • عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت در عمق‌های دلخواه خاک
• حسگر مقاومتی	• قابلیت اندازه‌گیری محتوای دقیق رطوبت خاک دارای دقت بالا زمانی که غلظت یونی خاک تغییر نمی‌کند.	• نیاز به واسنجی • تحت‌تأثیر تغییرات غلظت یونی قرار می‌گیرد
• تعدیل نوترونی	• امکان اندازه‌گیری آب در هر فازی • دقت بالا در دامنه وسیع در هر عمق	• هزینه بالا • تشعشعات خطرناک • عدم حساسیت به تغییرات کوچک
• تضعیف پرتو گاما	• قابلیت اندازه‌گیری میانگین رطوبت خاک و تغییرات آن در طول زمان	• هزینه بالا و پیچیدگی در استفاده • خطا در اندازه‌گیری در خاک‌های طبقه‌بندی‌شده • تحت‌تأثیر تغییرات چگالی ظاهری خاک قرار می‌گیرد.

۷. دستگاه TDR و PR2

در میان روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک از جمله روش وزنی، تانسیومتر، بلوک‌های گچی و روش پخش نوترون، استفاده از فناوری دستگاه بازتاب زمانی امواج (انعکاس‌سنجی زمانی)، روشی نسبتاً جدید، ساده و کاربردی در اندازه‌گیری رطوبت خاک است. استفاده از TDR، مبتنی بر خصوصیات غیرعادی آب از نظر ثابت دی‌الکتریک استوار است. ضریب دی‌الکتریک خاک زراعی با نوسان مقدار آب در خاک، به مقدار زیادی تغییر می‌کند. اگر ضریب دی‌الکتریک خاک زراعی بیشتر از ۸ باشد؛ نشانگر وجود آب در خاک است، ازآنجاکه در خاک زراعی بین مقدار آب و ضریب دی‌الکتریک رابطه‌ای مستقیم وجود دارد؛ بنابراین می‌توان از رابطهٔ بین آن‌ها، مقدار

1.Vera et al
2. Gamal et al

رطوبت خاک را استخراج کرد. به دلیل سهولت کار با روش دی‌الکتریک و امکان اتوماتیک کردن آن، امروزه استقبال زیادی از آن شده است (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲). با عبور یافتن یک موج الکترومغناطیس با سرعت نور در خاک، به دلیل وجود خاصیت دی‌الکتریک در خاک که ناشی از آب، خاک و هوای خاک است، این موج ضعیف گشته و در رفت و بازگشت آن به‌اندازه t زمان لازم خواهد داشت. باتوجه‌به مسیر رفت‌وبرگشت به‌اندازه دوبرابر L، مقدار ضریب دی‌الکتریک (D) از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$D=\left(\frac{c}{V}\right)^2=\left(\frac{c\times t}{2L}\right)^2 \quad (۱)$$

که در آن، L: طول میله یا پروب برحسب متر، t: زمان حرکت موج در رفت‌وبرگشت برحسب ثانیه، c: سرعت موج یا نور برابر با 3×10^8 متر بر ثانیه است. تاپ و دیویس[1] (۱۹۸۵) رابطه زیر را برای تعیین رطوبت خاک از مقدار ضریب دی‌الکتریک ارائه کردند:

$$\theta_V=-0.053+0.029(D)-5.5\times10^{-4}(D^2)+4.3\times10^{-6}(D^3) \quad (۲)$$

که در آن، θ_v و D به‌ترتیب رطوبت خاک و ضریب دی‌الکتریک خاک است. رابطه فوق تقریباً برای تمام خاک‌ها به همین شکل قابل‌استفاده است. دقت دستگاه تا ۲ درصد و تغییرات رطوبت در اندازه‌گیری‌های مختلف تا یک درصد است. رابطهٔ مذکور مستقل از ساختمان و بافت خاک برای همه خاک‌های معمول زراعی قابل‌استفاده است؛ اما در خاک‌های آلی، خاک‌های خاص با منشاء آتشفشانی نیازمند واسنجی می‌باشد. بهتر است فرکانس امواج ارسالی به داخل خاک کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز باشد تا مواد تشکیل‌دهنده خاک در مقدار ثابت دی‌الکتریک تأثیر مستقیم نگذارد. نکته قابل توجه در مورد این دستگاه که غالباً باعث اشتباه در اندازه‌گیری‌ها می‌گردد، عدم تماس کامل میله‌های حسگر با خاک و فاصله افتادن بین آن‌ها و خاک است. این حالت به‌خصوص در زمانی که خاک خشک و منقبض می‌شود، زیاد اتفاق می‌افتد. برای رفع این مشکل توصیه می‌شود، میله‌های حسگر به‌صورت مایل در خاک فرو برده شوند. در نوع پیشرفته‌تر که دارای پروب (حسگر لوله‌ای) هستند، بایستی مانند دستگاه نوترون‌متر ابتدا در خاک، لوله شفاف مخصوص دستگاه را نصب کرد و سپس با ارسال حسگر لوله‌ای به درون آن رطوبت در اعماق دلخواه تعیین کرد (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲).

دستگاه PR2 در دو مدل PR2/4 (چهار عمق) و PR2/6 (در شش عمق) برای اندازه‌گیری رطوبت در مقطع عمودی خاک کاربرد دارد. با دستگاه PR2 می‌توان رطوبت خاک را تا عمق یک‌متری اندازه‌گیری کرد. این دستگاه برای داشتن بهترین عملکرد در تمام انواع خاک و عملکرد خوب در خاک‌های سخت (رس سنگین) و خاک‌های شور طراحی شده است. در مدل PR2/6 بر روی میله یک‌متری که وارد خاک می‌شود، شش سنسور تعبیه شده است که هم‌زمان رطوبت خاک را در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری می‌کند (خورسند و همکاران، ۲۰۱۹؛ خورسند و همکاران، ۲۰۲۱). مقدار کسری رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی و درصد رطوبت خاک می‌تواند در صفحه نمایشگر دستگاه (HH2) نشان داده شود. این دستگاه می‌تواند ۱۸۰۰ قرائت را در خود ضبط کند. تنظیم این دستگاه برای خاک‌های مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی امکان‌پذیر می‌باشد. این دستگاه ساخت شرکت دلتا–تی انگلستان است. به‌طور کلی حسگر دستگاه‌های رطوبت‌سنج تولیدی شرکت دلتا–تی همگی رطوبت را براساس ضریب دی‌الکتریک خاک (D) با رابطه زیر تعیین می‌کنند:

$$\theta=\frac{\sqrt{D}-a_0}{a_1} \quad (۳)$$

مقادیر ثابت a_0 برای خاک‌های معدنی و آلی به‌ترتیب برابر ۱/۶ و ۱/۳ و مقادیر a_1 به‌ترتیب برابر ۸/۴ و ۷/۷ پیشنهاد شده است، البته جهت بالا بردن دقت اندازه‌گیری برای خاک‌های مختلف این ضرایب قابل واسنجی هستند. در صورت عدم واسنجی ممکن است، دستگاه خطای ۴ درصدی را در قرائت رطوبت موجب شود. لازم به ذکر است از دستگاه‌های رطوبت‌سنج از جمله TDR و PR2/6 در تحقیقات محمدی و همکاران[2] (۲۰۱۹) با عنوان اثرات مدیریت آبیاری و کود بر کاهش تلفات نیتروژن و افزایش عملکرد ذرت تحت آبیاری فارو و باریده و همکاران[3] (۲۰۱۸) با عنوان اثرات آبیاری موضعی ریشه بر کارایی مصرف آب، آب ریشه و جذب نیترات ذرت، استفاده گردید. در راستای انجام آبیاری‌های اتوماتیک، دستگاه PR2 همراه با نرم‌افزارهای مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد که با ثبت رطوبت خاک در اعماق مختلف، می‌توان حجم آب، زمان قطع و وصل آبیاری را مشخص کرد.

1. Topp and Davis
2. Mohammadi et al
3. Barideh et al

بحث

روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت خاک پرداخته و تکنیک‌های مرتبط با اتوماسیون و آبیاری هوشمند را بررسی کرده است. هدف این پژوهش، تجزیه‌وتحلیل تجهیزات و دانش روز در خصوص هوشمندسازی کشاورزی و شیوه‌های غیرمستقیم سنجش رطوبت حجمی خاک با استفاده از حسگرهای مختلف به‌منظور مدیریت بهینه آبیاری است. همچنین چالش‌های فنی موجود با رویکرد بررسی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها تحلیل شده است. در شرایط کنونی، کشاورزان با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و آب‌وهوایی روبرو هستند و برای تصمیم‌گیری مؤثر در مورد زمان و مکان کاشت به روش‌های بهینه نیاز دارند. استفاده از ابزارهای نوین می‌تواند نقش بسیار مؤثری در بهبود این فرآیند ایفا کند، چراکه سودمندی این روش‌ها هر دو جنبه زیست‌محیطی و اقتصادی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. مدیریت بهینه منابع آب یکی از اصلی‌ترین اهداف کشاورزی هوشمند است، امری که به‌ویژه در ایران، به دلیل کاهش بارندگی‌های اخیر، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. پیاده‌سازی این فناوری می‌تواند به استفاده مؤثر از منابع آب کشور منجر شود و کشاورزی هوشمند، همراه با فناوری‌های نوین، به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در حوزه تولیدات کشاورزی تبدیل خواهد شد. گرچه مزایای توسعه کشاورزی هوشمند در کشورهای پیشرفته به اثبات رسیده است، اما در ایران، لازمه موفقیت این فناوری، بسترسازی و توجه به ملاحظات خاص است. شاید بتوان مشکل اینترنت و برق را به‌عنوان موانع اصلی استفاده از تجهیزات هوشمند دانست که با گسترده شدن اینترنت و استفاده از فیبرهای خورشیدی، می‌توان بخش عمده‌ای از این مشکلات را مرتفع نمود. از طرف دیگر هزینه‌ی بالای اجرا و عدم دانش کافی از دلایلی است که کشاورزان رغبت چندانی به استفاده از این تجهیزات ندارند؛ لذا لازم است دولت و نهادهای ذی‌ربط چه از لحاظ مالی و چه از لحاظ ترویجی – آموزشی، زمینه‌ی استفاده از این تجهیزات را فراهم نمایند.

نتیجه‌گیری

تحقیقات نشان می‌دهد که بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند می‌تواند عملکرد گیاهان را بهبود بخشد، تلفات آب را کاهش دهد و آلودگی‌های زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی را کم کند. امروزه، دسترسی به اینترنت و گوشی‌های هوشمند در اکثر روستاها امکان‌پذیر شده و قشر جوان می‌تواند به‌طور گسترده به این امکانات دسترسی پیدا کند. بهره‌گیری از روش‌های هوشمند آبیاری به‌عنوان راه‌حلی مقبول و مؤثر برای مدیریت بحران و صرفه‌جویی در منابع آبی مطرح است. سامانه‌های آبیاری هوشمند در مصرف بهینه آب نقش اساسی ایفا کرده و در شرایط مختلف خاک، نوع سامانه آبیاری و میزان آب مصرفی باید قابل‌تغییر باشند. حسگرهای خازنی، امپدانس و حسگرهای TDR، FDR، TDT و PR2 به‌عنوان ابزارهایی برای تسهیل آبیاری خودکار در بستر اینترنت اشیا مورداستفاده قرار می‌گیرند. برای اجرای آبیاری‌های خودکار، حسگر PR2 در کنار نرم‌افزارهایی مانند Datalink Logger به کار می‌رود که توانایی ثبت رطوبت خاک در اعماق مختلف و تعیین حجم آب و زمان قطع و وصل آبیاری را فراهم می‌کند. در هنگام استفاده از این حسگرها، دقت نصب، مقیاس، مسائل واسنجی، منبع تغذیه و مصرف، هزینه و تأثیرات شوری بر رطوبت خاک باید مدنظر قرار گیرد. یک شبکه حسگر بی‌سیم دوطرفه[1] (WSAN) امکان نظارت بر عملکرد حسگرها و فعال‌سازی شیرهای برقی برای شروع آبیاری را با استفاده از اطلاعات بازخورد و عملکرد در زمان واقعی فراهم می‌کند. در مجموع، ترکیبی از روش‌های پایش مبتنی بر خاک، آب‌وهوا، و همچنین بر اساس گیاه، در کنار یک روش کنترل پیش‌بینی گسسته، باید موردتوجه قرار گیرد؛ درحالی‌که سیستم‌های کشاورزی – آبیاری فضای باز با عدم قطعیت‌هایی روبرو هستند، مطالعات آینده باید به توسعه رویکردهای دینامیک فرآیند برای سیستم‌های آبیاری و تأثیر روش‌های کنترل و نظارت هوشمند بر بهره‌وری آبیاری متمرکز شوند. در بین تجهیزات معرفی شده، اغلب وابسته به شرایط اقلیمی نبوده و می‌توان در هر شرایطی از آن‌ها بهره جست؛ برخی از تجهیزات نیز دارای دامنه‌ی کاربرد بوده و چون این دامنه‌ها به‌صورت هوشمندانه طراحی شده‌اند، می‌توان از آن‌ها در اغلب شرایط اقلیمی استفاده نمود. به‌عنوان‌مثال بارومتر می‌تواند در دمای ۴۰- الی ۱۲۵+ درجه سانتی‌گراد مورداستفاده قرار گیرد که این بازه در اغلب مناطقی که کشاورزی در آنجا صورت می‌گیرد، جوابگو است.

1. Wireless Sensor and Actuator Networks

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آن‌ها است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور یکسان در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

الهدادی، حمید.، لطیف‌منش، حجت‌اله.، و مرادی، علی. (۱۴۰۲). اثر رویکرد کشاورزی پایدار از منظر بوم‌شناختی در تأمین امنیت غذایی. نشریه *آماد و فناوری دفاعی*، ۶ (۴) ، ۱۶۴-۱۳۳. https://amfad.sndu.ac.ir/article_2706.html

باقری، نیکروز. (۱۳۹۸). فناوری اطلاعات بسترساز توسعه کشاورزی هوشمند. *مجله علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی*، (۱)۲، ۴۹-۳۵. https://doi.org/10.22092/aistj.2019.125170.1024

بشارت، سینا.، و خورسند، افشین. (۱۴۰۲). موضوعات پیشرفته در آب، خاک و گیاه (دستگاه‌های اندازه‌گیری و نرم‌افزارهای کاربردی). *انتشارات دانشگاه ارومیه*، ارومیه، ایران. https://cl.urmia.ac.ir/node/4438

پورکریمی، بهاره.، نیکنامی، مهرداد.، و جورابلو، مهدی. (۱۳۹۳). نیازمندی‌های ترویجی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در استان تهران. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۸ (۲) ، ۳۲۸-۳۱۵. https://doi.org/10.22092/jwra.2014.100033

توسن، معین.، خاشعی سیوکی، عباس.، ماروسی، علی.، و قریب، محمدرضا. (۱۴۰۳). مروری بر مدیریت هوشمند آب در استقرار کشاورزی پایدار مبتنی بر اینترنت اشیا. *مجله مدیریت آب در کشاورزی*، ۱۱ (۱) ، ۱۶۶-۱۴۵. https://wmaj.iaid.ir/article_185939.html

ثابت، فربد.، و محمدپور، مسلم. (۱۴۰۰). کشاورزی هوشمند. *مجله علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی*، ۴ (۱) ، ۵۸-۴۹. https://doi.org/10.22092/aistj.2022.359077.1067

حسنی، یوسف.، هاشمی، مهدی.، و زهرائی، بنفشه. (۱۳۹۳). توسعه ساختار جدید بهره‌برداری اقتصادی در شبکه‌های آبیاری فاقد بازار آب. *علوم آب و خاک*، ۲۴ (۱) ، ۴۳-۲۷. http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.1.39232

خورسند، افشین.، رضاوردی‌نژاد، وحید.، عسگرزاده، حسین.، مجنونی هریس، ابوالفضل.، رحیمی، امیر.، و بشارت، سینا. (۱۳۹۸a). برنامه‌ریزی آبیاری ماش سیاه براساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) تحت روش آبیاری قطره‌ای. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۹) ، ۲۱۳۸-۲۱۲۵. https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280132.668179

خورسند، افشین.، رضاوردی‌نژاد، وحید.، عسگرزاده، حسین.، مجنونی هریس، ابوالفضل.، رحیمی، امیر.، بشارت، سینا.، و صدرالدینی، علی اشرف. (۱۳۹۸b). تعیین شاخص تنش آبی (CWSI) جهت تشخیص تنش آب محصول ذرت در منطقه ارومیه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۴) ، ۸۸۴-۸۷۳. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.261912.667967

کاظم علیلو، وحید.، و جمشیدی، بهاره. (۱۴۰۱). کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی هوشمند اقلیم. *نشریه علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی*، ۵ (۲) ، ۵۱-۶۰. https://doi.org/10.22092/jaist.2023.362065.1090

کشاورز، عباس.، فکاری سردهایی، بهزاد.، بیکی، اعظم.، خسروی، عبدالرحیم.، فارسی، محمدمهدی.، ملکیان، راحله.، و نژندعلی، عاطفه. (۱۴۰۰). مجموعه اسناد مرتبط با سند ملی و راهبردی تحول امنیت غذایی؛ چالش‌های بخش کشاورزی کشور. *نشر آموزش کشاورزی*، تهران، ایران. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_9920.html

گرامی طیبی، م. (۱۳۹۶). مزارع و کشاورزی آینده: کوچک و هوشمند. https://ayandehpajoohi.com/articlesfuturesstudies

References

Asefa, A., & Tadesse, M. (2024). Pros and Cons of Different Irrigation Scheduling Approaches: A Review. *American Journal of Bioscience and Bioengineering*, 12(6), 91-96. https://doi.org/10.11648/j.bio.20241206.11

Azar, A. T., Ammar, H. H., de Brito Silva, G., & Razali, M. S. A. B. (2019). Optimal proportional integral derivative (PID) controller design for smart irrigation mobile robot with soil moisture sensor. *In International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications* , Springer, Cham, New York Sity, United states. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14118-9_35

Bagheri, N. (2019). Information Technology an infrastructure for development of intelligent agriculture. *Agricultural Information Sciences and Technology*, *2*(1), 35-49. https://doi.org/10.22092/aistj.2019.125170.1024 (In Persian)

Barideh, R., Besharat, S., Morteza, M., & Rezaverdinejad, V. (2018). Effects of Partial Root-Zone Irrigation on the Water Use Efficiency and Root Water and Nitrate Uptake of Corn. *Water*, 10, 526. https://doi.org/10.3390/w10040526

Besharat, S., & Khorsand, A. (2023). Advanced subjects in the water, soil and plant (Measurement Devices and Practical Software). *Urmia University Press,* Urmia, Iran. https://cl.urmia.ac.ir/node/4438 (In Persian)

Biabi, H., Mehdizadeh, S. A., & Salmi, M. S. (2019). Design and implementation of a smart system for water management of lilium flower using image processing. *Computers and Electronics in Agriculture,* 160, 131-143. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.019

Cerovic, Z. G., Ghozlen, N. B., Milhade, C., Obert, M., Debuisson, S., & Moigne, M. L. (2015). Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (Vitis vinifera L.) based on dualex leaf-clip measurements in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(14), 3669-3680. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00304

Chidambaranathan, C. M., Hand, S. S., & Ramanamurthy, M. V. (2018). Development of smart farming—a detailed study. *International Journal of Engineering and Technology,* 7(2.4), 56-58. https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.4.10042

Clarke Topp, G., & Ferré, P. A. T. (2018). 3.1 Water Content. *Methods of Soil Analysis*, 417–545. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c19

De Pinto, A., Cenacchi, N., Kwon, H. Y., Koo, J., & Dunston, S. (2020). Climate smart agriculture and global food-crop production. *PLOS ONE,* 15(4), 1–19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231764

Di Gennaro, S.F., Cini, D., Berton, A., & Matese, A. (2024). Development of a low-cost smart irrigation system for sustainable water management in the Mediterranean region. *Smart Agricultural Technology*. 9,100629. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100629

Elahdadi, H., Latifmanesh, H., & Moradi, A. (2024). The effect of sustainable agriculture approach from an ecological perspective on ensuring food security. *Defense readiness and technology*, (4)6, 133-164. https://amfad.sndu.ac.ir/article_2706.html (In Persian)

FAO. (2022). AQUASTAT - FAO's global information system on water and agriculture. *FAO*, Quebec City, Canada. https://www.fao.org/aquastat/en

Fuentes-Peñailillo, F., Ortega-Farías, S., Acevedo-Opazo, C., Rivera, M., & Araya-Alman, M. (2024). A Smart Crop Water Stress Index-Based IoT Solution for Precision Irrigation of Wine Grape. *Sensors*, 24(1), 25. https://doi.org/10.3390/s24010025

Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Madian, A. H., & Radwan, A. G. (2024). Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access,* 1–1. https://doi.org/10.1109/access.2023.3251655

Gerami Tayyibi, M. (2017). Farms and Future Agriculture: Small and Smart. http://ayandehpajoohi.com/articles futurestudies/ (In Persian)

Hammouch, H., A.El-Yacoubi, M., Qin, H. & Berbia, H. (2024). A Systematic Review and Meta-Analysis of Intelligent Irrigation Systems. *IEEE Access*, 12, 128285-128304. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421322

Hardie, M. (2020). Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors,* 20(23), 6934. https://doi.org/10.3390/s20236934

Hassani, Y., Hashemy Shahdany, S. M., & Zahraei, B. (2020). Developing A New Operation-Economic Framework for Irrigation Networks without Water Market. *Journal of Water and Soil Science,* 24(1), 27-43. http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.1.39232 (In Persian)

He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications,* 12(1), 4667. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3

Kaya, S., & Curran, P. J. (2006). Monitoring urban growth on the European side of the Istanbul metropolitan area: A case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 18–25. https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.002

Kazem Alilou, V., & Jamshidi, B. (2023). Application of artificial intelligence in climate smart agriculture. *Agricultural Information Sciences and Technology*, *5*(2), 51-60. https://doi.org/10.22092/jaist.2023.362065.1090 (In Persian)

Keshavarz, A., Fakari Sardhaei, B., Beiki, A., Khosravi, A., Farsi, M. M., Malekian, R., & Najandali, A. (2021). Collection of documents related to the national and strategic document for food security development; Challenges of the country's agricultural sector. *Agricultural Education Publication,* Tehran, Iran. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_9920.html (In Persian)

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Heris, A. M., Rahimi, A., & Besharat, S. (2020). Response of maize and black gram yield and water productivity to variations in canopy temperature and crop water stress index. *International Agrophysics,* 34(3), 381-390. https://doi.org/10.31545/intagr/126439

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., & Sadraddini, A. A. (2019). Determination of A Crop Water Stress Index (CWSI) For Detecting Water Stress time of Maize Crop in the Urmia Region. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(4), 873-884. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.261912.667967 (In Persian)

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2020). Irrigation scheduling of Black Gram based on Crop Water Stress Index (CWSI) under drip irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2125-2138. https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280132.668179(In Persian)

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2019). Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management,* 224, 105740. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105740

Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., & Sadraddini, A. A. (2021). Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. *Scientific Reports,* 11, 869. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79516-3

Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Baghini, M. S. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement,* 54, 92–105. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007

Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S., & Branca, G. (2018). Climate smart agriculture: Building resilience to climate change. *Natural Resource Management and*

Policy, Springer International Publishing, 52, Springer, New York Sity, United states. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5

Mohammadi, A., Besharat, S., & Abbasi, F. (2019). Effects of irrigation and fertilization management on reducing nitrogen losses and increasing corn yield under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 213, 1116-1129. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.007

Nhamo, N., Chikoye, D., & Gondwe, T. (2017). Preface. Smart Technologies for Sustainable Smallholder Agriculture, xv–xvi. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810521-4.05001-5

Pourkarimi, B., Niknami, M., & Jourabloo, M. (2014). Extension Requirements of Drip Irrigation Systems in Tehran Province. *Journal of Water Research in Agriculture*, *28*(2), 315-328. https://doi.org/10.22092/jwra.2014.100033 (In Persian)

Sabet, F., & Mohammadpour, M. (2021). Smart farming. *Agricultural Information Sciences and Technology*, *4*(1), 49-58. https://doi.org/10.22092/aistj.2022.359077.1067 (In Persian)

Singh, C. D., Rao, K. V., Kumar, M., & Rajwade, Y. A. (2023). Development of a smart IoT-based drip irrigation system for precision farming. *Irrigation and Drainage*, 72(1), 21–37. https://doi. org/10.1002/ird.2757

SOLAW. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. *FAO*, Quebec City, Canada. https://doi.org/10.4060/cb7654en

Tabatabaei, S. M., Dastourani, M., Eslamian, S., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Ranking and optimizing the rain-gauge networks using the entropy–copula approach (Case study of the Siminehrood Basin, Iran). *Applied Water Science,* 12(9), 214. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01735-y

Topp, G. C., & Davis, J. L. (1985). Measurement of soil water content using time-domain reflectrometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 49(1), 19-24. https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900010003x

Tosan, M., Khashei-Siuki, A., Maroosi, A., & Gharib, M. R. (2024). A Review of Smart Water Management for Sustainable Agriculture Based on the Internet of Things. *Water Management in Agriculture*, *11*(1), 145-166. https://wmaj.iaid.ir/article_185939.html (In Persian)

Vera, J., Abrisqueta, I., Conejero, W., & Ruiz-Sanchez, M. C. (2017). Precise sustainable irrigation: A review of soil-plant-atmosphere monitoring. *Acta Horticulturae,* 1150, 195–200. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.28

Vera, J., Conejero, W., Mira-Garcia, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation, automation based on dielectric soil sensors. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(6), 696-707. https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761

Razi University

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

AI application of the outlier-robust extreme learning machine (ORELM) model in river discharge prediction

Rosa Adibrad[1], **Bita Khosravinejad**[2], and **Mohammad Hossein Adibrad** [3]✉

1. Department of Computer Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: r.adibrad@stu.razi.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: bitakhosravinejad79@gmail.com
3. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.adibrad@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 11 December 2024
Received in revised from 03 February 2025
Accepted 15 March 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
river discharge prediction,
machine learning,
Pol Kohneh,
ORELM.

ABSTRACT

Objective: This study focuses on evaluating the effectiveness of the Outlier-robust extreme learning machine (ORELM) model in predicting the discharge of the Qarasu River at the Pol Kohneh hydrological station in Kermanshah.

Method: The study focuses on the Pol Kohneh watershed along the Qarasu River, which originates from Sarab Ravansar, 50 kilometers northwest of Kermanshah. This study applies ELM to predict rainfall and river discharge using hydrological and meteorological data. ELM's ability to handle complex, nonlinear relationships makes it suitable for forecasting, especially in real-time applications. To improve accuracy, outlier removal is performed before training. The model efficiently predicts future discharge values, offering a scalable solution for water resource management and flood risk assessment.

Results: The RMSE values for a one-month lag (t-1) were recorded as 12.22 and 4.14 for the training and testing phases, respectively. The findings of this study highlight the potential of artificial intelligence-based models like ORELM in hydrological forecasting. Unlike traditional methods, these models require significantly less time and computational effort while delivering accurate predictions. By leveraging machine learning techniques, water resource managers can efficiently forecast river discharge trends, aiding in effective decision-making for flood management, irrigation planning, and water allocation during dry and wet periods.

Conclusions: The ability of ORELM to handle long-term discharge predictions with minimal input data makes it a valuable tool for hydrological studies, particularly in data-scarce regions where conventional models face limitations.

Cite this article: Adibrad, R., Khosravinejad, B., & Adibrad, M.H. (2025). AI application of the outlier-robust extreme learning machine (ORELM) model in river discharge prediction, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(3), 44-55. https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11918.1159

© The Author(s)
https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11918.1159

Publisher: Razi University.

Introduction

Accurate prediction of river discharge is crucial for the effective management of surface water resources, influencing areas such as domestic water supply, irrigation, hydropower generation, and environmental sustainability. River discharge forecasting can be categorized into short-term and long-term predictions, where short-term forecasts typically cover periods of less than a week, while long-term predictions extend over several months. Given the complexity and non-linearity of hydrological processes, traditional physical and conceptual models often face challenges in predicting river flow accurately, particularly in ungauged basins or regions with highly variable climatic conditions.

Recent advancements in artificial intelligence (AI) have introduced machine learning (ML) techniques as powerful alternatives to conventional hydrological models. AI-based approaches, such as backpropagation neural networks (BPNN), long short-term memory (LSTM), and extreme learning machines (ELM), have demonstrated significant improvements in discharge prediction. Hybrid models integrating optimization algorithms, signal decomposition methods, and preprocessing techniques have further enhanced accuracy, especially in regions with limited hydrological data.

Method

Area

The study focuses on the Pol Kohneh watershed along the Qarasu River, which originates from Sarab Ravansar, 50 kilometers northwest of Kermanshah. As it flows southeast, the river merges with several tributaries, including the Razavar and Mereg rivers, before passing through Kermanshah. Within the city, it converges with the Cham-Bashir and Abshuran rivers before eventually joining the Gamasiab River near Faraman. Hydrological data from the Pol Kohneh station on the Qarasu River was used for this research.

ELM

Extreme Learning Machine (ELM) is a fast and efficient machine learning algorithm for classification and regression. Unlike traditional neural networks, it assigns random hidden layer weights and computes output weights analytically, avoiding iterative backpropagation. This study applies ELM to predict rainfall and river discharge using hydrological and meteorological data. ELM's ability to handle complex, nonlinear relationships makes it suitable for forecasting, especially in real-time applications. To improve accuracy, outlier removal is performed before training. The model efficiently predicts future discharge values, offering a scalable solution for water resource management and flood risk assessment.

Results

This study utilizes the ORELM method to predict river flow discharge and assess its potential as an alternative to complex models, especially in cases where numerical models are impractical or data is limited. The model uses past monthly discharge data (t-1, t-2, t-3) as inputs to forecast the current discharge at the Qarasou River's Pol-e Kohneh station. Results show that the ORELM model with a one-step delay (t-1) achieves the highest accuracy during training and testing. The model's predictions closely align with observed data, demonstrating its effectiveness for river flow forecasting. The results of applying the ORELM artificial intelligence model indicate that this method successfully predicted river inflow with minimal error over a 65-year statistical period during both training and testing phases. The RMSE value for a one-month lag time (t-1) was 12.22 during training and 4.14 during testing. For lag times of 2 and 3 months, the RMSE in the testing phase was approximately 9.29 and 8, respectively.

These results demonstrate that the ORELM model can accurately predict river discharge without requiring extensive data or complex modeling processes based on governing equations.

Conclusions

One of the most significant achievements of this study is the ability to predict river discharge over a long-term period using minimal data compared to numerical models. This approach relies solely on past river flow data without requiring meteorological, soil, or geological parameters, cross-section information, complex mapping software, or extensive time and costs for model calibration and validation. This is particularly beneficial for water resource specialists working in data-scarce basins or rivers with incomplete records. By utilizing artificial intelligence models, valuable management insights can be obtained with minimal time and cost, allowing for accurate discharge predictions in both dry and wet years. The evaluation of the ORELM artificial intelligence model at the Qarasou River (Pol-e Kohneh station) demonstrated its high accuracy in predicting river discharge. Over a 65-year statistical period, the model achieved minimal error in both training and testing phases. Specifically, the RMSE for a one-month delay (t-1) was 12.22 during training and 4.14 during testing. For delays of two and three months, the RMSE values were 9.29 and 8.00, respectively, indicating that the ORELM model can accurately predict river discharge without requiring extensive data or complex mathematical modeling. Empirical results show that the developed method outperforms traditional approaches based on various performance metrics. Thus, a new, practical evolutionary extreme learning machine model using swarm intelligence has been developed for complex hydrological forecasting tasks. However, applying the proposed method in practice may have limitations, as determining optimal neural network parameters is theoretically challenging, especially given the variations in hydrological characteristics across different locations. With the rapid advancement of computing technology, the effectiveness of the proposed method can be enhanced by introducing more efficient soft computing techniques or developing more robust optimization strategies. Additionally, integrating newly developed signal processing techniques could further improve its performance. Finally, the results confirmed that time delay is a crucial input feature that significantly affects the predictive accuracy of the model.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors .

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct .

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

کاربرد مدل هوش مصنوعی ماشین آموزش نیرومند با حذف داده پرت (ORELM) در پیش‌بینی دبی رودخانه

رزا ادیب‌راد[۱]، بیتا خسروی‌نژاد [۲]، و محمدحسین ادیب‌راد[۳]✉

۱. گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه:r.adibrad@stu.razi.ac.ir
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: bitakhosravinejad79@gmail.com
۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.adibrad@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
پیش‌بینی دبی رودخانه،
یادگیری ماشین،
پل کهنه،
ORELM.

چکیده

هدف: هدف از این تحقیق بررسی کارایی مدل ماشین آموزش نیرومند (ORELM) برای پیش‌بینی دبی رودخانه قره‌سو در محل ایستگاه پل کهنه (کرمانشاه) است.

روش پژوهش: محدوده موردمطالعه حوضه آبریز پل کهنه واقع بر رودخانه قره‌سو است. آموزش ELM شامل دو مرحله است: مرحله اول، اختصاص تصادفی وزن‌ها و بایاس‌ها به نرون‌های لایه پنهان و محاسبه خروجی لایه پنهان ماتریس H و مرحله دوم، محاسبه وزن‌های خروجی با استفاده از شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس H و مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزشی مختلف. جهت محاسبه ماتریس وزن خروجی ، خطای آموزش را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیرند که ماتریس sparse باشد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از کاربرد مدل هوش مصنوعی ORELM نشان می‌دهد این روش توانسته است در دوره آماری ۶۵ساله با کمترین میزان خطا در مراحل آموزش و آزمایش دبی ورودی رودخانه را پیش‌بینی نماید. به‌طوری که مقدار RMSE در این روش در حالت تأخیر یک‌ماهه (t-1) در دو مرحله آموزش و آزمایش به ترتیب ۱۲/۲۲و ۴/۱۴ بود. لذا با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با صرف زمان و هزینه بسیار کم اطلاعات مدیریتی بسیار ارزشمندی در خصوص پیش‌بینی دبی جریان رودخانه در سال‌های خشک و تر به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری: نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش توسعه‌یافته باتوجه‌به شاخص‌های مختلف ارزیابی عملکرد نسبت به روش‌های سنتی برتری دارد؛ بنابراین، یک مدل ماشین یادگیری افراطی تکاملی جدید و عملی با استفاده از هوش ازدحامی برای انجام کار پیچیده پیش‌بینی هیدرولوژیکی توسعه داده شده است. نوآوری این تحقیق عبارت است از توسعه مدل هوش مصنوعی ORELM باقابلیت حذف داده‌های پرت برای پیش‌بینی دبی رودخانه بر اساس کمترین اطلاعات ورودی بدون نیاز به مدل‌های پیچیده در کمترین زمان است.

استناد: ادیب‌راد، رزا؛ خسروی‌نژاد، بیتا؛ و ادیب‌راد، محمدحسین. (۱۴۰۴). کاربرد مدل هوش مصنوعی ماشین آموزش نیرومند با حذف داده پرت (ORELM) در پیش‌بینی دبی رودخانه. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۳)، ۵۵-۴۴.
https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11918.1159

شر: دانشگاه رازی. © نویسندگان CC BY NC

مقدمه

مدیریت علمی منابع آب‌های سطحی نیازمند پیش‌بینی و تخمین دقیق دبی جریان رودخانه‌ها در آینده است. پیش‌بینی دبی جریان را می‌توان در دو دسته کلی شامل پیش‌بینی کوتاه‌مدت و پیش‌بینی بلندمدت تقسیم نمود. در پیش‌بینی‌های کوتاه مدت معمولاً افق زمانی پیش‌بینی را کمتر از هفت روز در نظر می‌گیرند، در صورتی که در پیش‌بینی‌های بلند مدت این افق زمانی طولانی بوده و می‌تواند تا چندین ماه هم در نظر گرفته شود.

انجام پیش‌بینی دقیق و مطمئن جریان روزانه رودخانه با یک سیستم خبره از وظایف محوری مدیریت منابع آب است. چنین مدل قوی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب توسط هیدرولوژیست ها برای ارزیابی پایداری موثر منابع آب از جمله استفاده از آن در تقاضای خانگی، آبیاری، برق آبی و کشاورزی مورداستفاده قرار گیرد. علاوه بر این، مدل‌های خبره برای برنامه ریزی کاربردهای آتی در حفاظت از محیط زیست و توسعه سیستم های تعادل آب مفید هستند. به‌طورکلی، ایجاد یک مدل پیش‌بینی دقیق برای انواع اقلیم‌های آبی و محیط‌های حوضه آبخیز بسیار مهم و در عین حال یک کار دشوار است . بااین‌حال، کارایی پاسخ خروجی هر مدل به طور قابل‌توجهی بر اساس ویژگی‌های حوضه مدل‌سازی شده است . به‌عنوان مثال، مناطق اقلیمی گرمسیری تحت تأثیر بارندگی شدید موسمی (که گاه به گاه، متناوب و اغلب کاملاً غیرقابل پیش‌بینی هستند) هستند که می‌توانند تغییرات الگوهای جریان رودخانه را در مقایسه با حالت عادی آن بسیار پیچیده‌تر و غیرخطی‌تر کنند. از آنجایی که پیش‌بینی چنین رفتارهایی با مدل‌های فیزیکی یا هیدرولوژیکی که به شرایط اولیه دقیق نیاز دارند دشوار است، کاوش مدل‌های محاسباتی نرم همه‌کاره‌تر و پاسخ‌گوتر در این حوزه از نیاز، یک ماموریت مطلوب برای پیش‌بینی‌کنندگان هیدرولوژیکی باقی می‌ماند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

اخیراً یک رویکرد یادگیری نسبتاً جدید پیشنهاد شده است، یعنی ماشین‌های یادگیری افراطی (هوانگ و همکاران[1] ، ۲۰۰۶) . مزیت اصلی این مدل در ویژگی نگاشت ویژگی داخلی آن بدون نیاز به تنظیم تکراری پارامترهای نورون پنهان است که برای مدل شبکه عصبی مصنوعی معمولی مورد نیاز است. در یک مدل ELM وزن نورون ورودی و پنهان به طور تصادفی از تعداد زیادی نورون از پیش تعیین شده بدون عبور از هر نورون در مدل محاسبه می‌شود. علاوه بر این، مدل ELM از مهارت تعمیم قابل قبولی برخوردار است و هزینه مصرف زمان کمتری بر اساس چندین برنامه کاربردی اجرا شده دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۵.، و دعو و همکاران[2]، ۲۰۱۷). همچنین طی پنج سال گذشته مشاهده شده است که روند گسترده ای در اجرای مدل ELM با استفاده خاص در تجزیه و تحلیل متن مشاهده شده است: سیستم کنترل، طرح‌ها، مدل‌سازی و پیش‌بینی‌های سیستم ، کاربردهای سنجش از دور، و چندین زمینه علوم و مهندسی (سالسدو سانز و همکاران[3]، ۲۰۱۴).

در مطالعه گرگانی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل DRASTIC و تحلیل سری زمانی، تأثیر کاهش بارندگی و سطح آب زیرزمینی را بر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت ماهیدشت بررسی شد و پیش‌بینی‌ها نشان داد که تا سال ۲۰۳۲، به دلیل کاهش سطح آب و تغذیه، شاخص DRASTIC کاهش یافته و آسیب‌پذیری کمتر خواهد شد.

اخیراً، بررسی رویکرد ELM در مسائل عملی مربوط به هیدرولوژی، هواشناسی، مطالعات اقلیمی، مورفولوژی، مهندسی هیدرولیک، مطالعات رطوبت خاک و علوم زیست‌محیطی یافته‌های بسیار خوش‌بینانه‌ای را به دست آورده است. بر اساس بررسی دقیق کارهای تحقیقاتی موجود، آشکار است که اکثر برنامه‌های کاربردی مدل ELM بر روی کاربردهای چندمتغیره و به‌ویژه در مدل‌سازی سیستم‌های اقلیمی و محیطی توسعه یافته‌اند. این به دلیل این واقعیت است که مدل ELM قادر به شناسایی رابطه

1. Huang et al
2. Deo et al
3. Salcedo-Sanz et al

غیرخطی است که فرایندهای فیزیکی بین پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌ها را نشان می‌دهد و به دلیل شایستگی‌های آن که توسط فرآیند یادگیری تصادفی هدایت می‌شود. در مدل‌سازی پیش‌بینی جریان رودخانه، پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی و ژئوفیزیکی معمولاً به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شوند، درحالی‌که سری زمانی جریان رودخانه در ایستگاه خاص پیش‌بینی‌کننده است. این مدل‌ها فرض ذاتی ایستایی را در رابطه بین پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی‌کننده‌ها در نظر می‌گیرند. بااین‌حال، در موارد واقعی، بسته به داده‌های واقعی، این فرض ممکن است درست نباشد. در موارد شناسایی غیرثابت در روابط بین پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌کننده، نتایج مدل نامشخص می‌شود. به‌این‌ترتیب، تعیین دلایل احتمالی پس از شناسایی هر گونه غیرایستایی خاص مهم است و باید در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها دقت کرد تا از وقوع هر گونه غیرایستایی جلوگیری شود.

در مطالعه انجام شده توسط فاطمی و پروینی[1] (۲۰۲۲)، به مدل‌سازی سری زمانی برای پیش‌بینی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل ANFIS می‌پردازد. تأثیر اشکال تابع خودهمبستگی (ACF) شامل سینوسی و نزولی بر انتخاب ورودی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب ورودی‌ها از محدوده غیرایستا دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد و استفاده از معکوس استانداردسازی برای ACF نزولی عملکرد را بهبود می‌بخشد. به‌طورکلی، انتخاب ورودی‌ها بر اساس نمودار ACF مؤثرتر از تنظیم مدل یا تغییر مولدهای فازی است. روش‌های کنونی برای ادغام هوش مصنوعی (AI) در پیش‌بینی بارندگی و دبی رودخانه شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های یادگیری ماشین و مدل‌های ترکیبی است. به‌طور خاص، مطالعات از شبکه‌های عصبی پس انتشار (BPNN)، حافظه طولانی – کوتاه‌مدت (LSTM) و ماشین یادگیری بیشینه (ELM) برای مدل‌سازی دبی رودخانه استفاده کرده‌اند که در این میان، LSTM در برخی موارد دقت بالاتری نشان داده است (باربولسکو و چن، ۲۰۲۴). علاوه بر این، رویکردهای ترکیبی که شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (MLPNN) را با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند NSGA-II و تکنیک‌های پیش‌پردازش داده‌ها مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) ترکیب می‌کنند، در حوضه‌های رودخانه‌ای با داده‌های محدود عملکرد بهتری نشان داده‌اند (مروتی و کیسی[2]، ۲۰۲۴). همچنین، مدل‌های ترکیبی پیشرفته که روش‌های تجزیه سیگنال را با LSTM ادغام می‌کنند، نتایج امیدوارکننده‌ای را به‌ویژه در پیش‌بینی رواناب‌های شدید ارائه داده‌اند (ژانگ و همکاران[3]، ۲۰۲۵). رگرسیون جنگل تصادفی[4] نیز به‌عنوان مدلی قدرتمند برای پیش‌بینی جریان رودخانه شناخته شده است و در برخی از کاربردهای حوضه‌های آبخیز، عملکرد بهتری نسبت به سایر تکنیک‌های هوش مصنوعی داشته است (رجا شکر و متیو[5]، ۲۰۲۴). در نهایت، مدل‌های یادگیری ماشین به‌طور مؤثر در پیش‌بینی سیلاب‌های لحظه‌ای به کار گرفته شده‌اند و در مقایسه با روش‌های سنتی، به‌ویژه زمانی که داده‌های جامع بارندگی مورداستفاده قرار می‌گیرند، دقت پیش‌بینی بهتری نشان داده‌اند (دفونتین و همکاران[6]، ۲۰۲۴).

دارابی چقابلکی و همکاران[7] (۲۰۲۴) به ارزیابی پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از یادگیری ماشین، با تمرکز بر پیش‌پردازش، تنظیم مدل و انتخاب ویژگی می‌پردازد. جریان ماهانه در ایستگاه پل چهر با استفاده از مدل‌های SVR و GA-SVR و دو روش اعتبارسنجی متقاطع k-fold و سری زمانی پیش‌بینی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش k-fold معمولاً عملکرد بهتری نسبت به سری زمانی دارد، به‌ویژه با استفاده از پیش‌پردازش. استانداردسازی دقت پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد، درحالی‌که بهینه‌سازی با GA تنها برای داده‌های خام مؤثر است. بهترین نتایج با استفاده از روش k-fold همراه با پیش‌پردازش به دست می‌آید و دقت بالایی را بدون نیاز به تنظیمات اضافی ارائه می‌دهد.

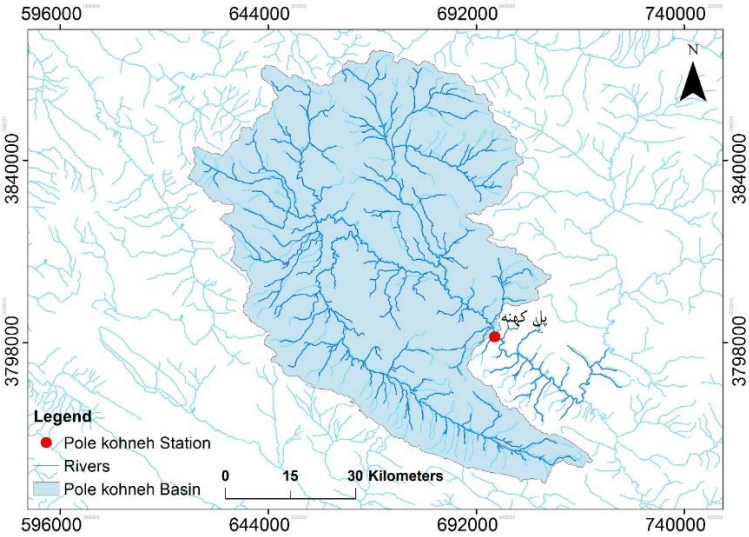
1. Fatemi & Parvini
2. Morovati & Kisi
3. Zhang et al
4. Random Forest Regression
5. Raja Shekar & Mathew
6. Defontaine et al
7. Darabi Cheghabaleki et al

بررسی‌ها نشان می‌دهد با وجود اینکه مدل‌های مفهومی یا مبتنی بر اطلاعات فیزیکی و داده‌های اقلیمی برای درک فرایندهای هیدرولوژیکی اهمیت دارند، حوضه‌های فاقد آماری وجود دارند که پیش‌بینی دقیق جریان در آنها بر اساس داده‌های اقلیمی ممکن نیست. همچنین استفاده از مدل‌های ریاضی علاوه بر پیچیدگی، نیاز به فرآیند وقت‌گیر واسنجی و صحت سنجی دارد. در چنین شرایطی ترجیح داده می‌شود که یک مدل ساده (داده‌محور یا یادگیری ماشین) توسعه داده شود تا با ایجاد ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های گسترده برای پیش‌بینی مستقیم دبی رودخانه مورداستفاده قرار گیرد؛ لذا هدف از این تحقیق این است که کارایی روش ماشین یادگیری افراطی با حذف داده پرت (ORELM) به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی دبی جریان رودخانه موردبررسی و ارزیابی قرار گیرد.

روش پژوهش

۱. منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه حوضه آبریز پل کهنه واقع بر رودخانه قره‌سو است که در شکل (۱) نشان‌داده‌شده است. رودخانه قره‌سو از سراب روانسر واقع در ۵۰ کیلومتری شمال غرب کرمانشاه سرچشمه می‌گیرد و با جهت شمال غربی به جنوب شرقی جریان پیدا می‌کند . در ۱۵ کیلومتری کرمانشاه رودخانه رازآور و شاخه‌های فرعی آن به قره‌سو می‌ریزد. سپس در سطح دشت جریان یافته و در نزدیکی روستای قزانچی رودخانه مِرِگ نیز به آن متصل می‌شود. قره‌سو با یک شیب آرام از داخل شهر کرمانشاه عبور کرده و در این محدوده دو رودخانه چم‌بشیر و آبشوران نیز به آن می‌ریزند و در نهایت پس از عبور از کرمانشاه در نزدیکی فرامان به رودخانهٔ گاماسیاب می پیوندد. برای این تحقیق از داده‌های ایستگاه پل کهنه واقع بر رودخانه قره‌سو استفاده شد.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه و ایستگاه موردمطالعه در کرمانشاه

۲. مدل هوش مصنوعی

ماشین آموزش نیرومند[1]

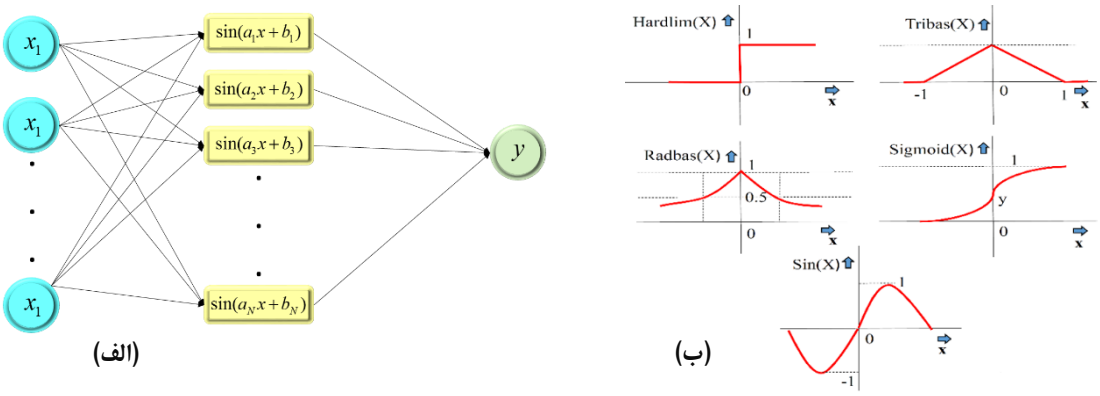
ماشین آموزش نیرومند (ELM) یک شبکه عصبی پیشخور[2] تک‌لایه بوده و توسط هوانگ و همکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۶) ارائه شده است. ELM وزن‌های ورودی را به‌صورت تصادفی وزن‌های خروجی را به‌صورت تحلیلی[3] تعیین می‌کند. ساختار کلی این الگوریتم در شکل (۲- الف) ارائه شده است. تنها تفاوت ELM با شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه[4] (SLFFNN)، عدم استفاده از بایاس[5] برای نرون خروجی است. نرون‌های لایه ورودی با همه نرون‌های لایه مخفی در ارتباط است. تابع فعال‌سازی نرون‌های مخفی می‌تواند به‌صورت تابع پیوسته تکه‌ای[6] باشد درحالی‌که برای نرون لایه خروجی به‌صورت خطی است. مدل ELM از الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌ها و بایاس‌ها استفاده می‌کند که در نتیجه کاهش قابل‌توجه زمان آموزش شبکه را به همراه دارد. توصیف ریاضی شبکه عصبی پیشخور تک‌لایه با تعداد n گره مخفی، در رابطه (۱) بیان شده است:

$$f_n(x)=\sum_{i=1}^{n} \beta_i G(a_i,b_i,x) \quad (۱)$$

که β_i وزن بین گره مخفی i ام و گره خروجی، a_i $(a_i \in R^n)$ و b_i فاکتورهای آموزش گره‌های مخفی و $G(a_i, b_i, x)$ خروجی گره i ام برای ورودی x است. تابع فعال‌سازی g(x) (که دارای انواع مختلفی می‌باشند) برای گره مخفی افزاینده[7] $G(a_i, b_i, x)$ را می‌توان به شکل رابطه (۲) بازنویسی کرد:

$$G(a_i,b_i,x)=g(a_i.x+b_i) \quad (۲)$$

از توابع فعال‌سازی به‌منظور محاسبه خروجی پاسخ نرون‌ها استفاده می‌شود. زمانی که مجموعه‌ای از سیگنال ورودی وزن‌دار اعمال می‌شود، برای به‌دست‌آوردن پاسخ از توابع فعال‌سازی استفاده می‌شود. توابع فعال‌سازی غیرخطی ELM که در این مطالعه موردبررسی قرار گرفته است شامل تابع پله‌ای (hardlim)، سیگموید[8] (sig)، سینوسی (sin)، بایاس مثلثی (tribas) و بایاس شعاعی (radbas) است که به‌صورت شکل (۲) تعریف می‌شوند.



شکل ۲. الف) ساختار شبکه ELM ب)توابع فعال‌سازی مختلف در مدل ELM

فعال‌سازی نرون‌های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی در یک شبکه ELM با تعداد"j" نرون در لایه مخفی، "i" نرون ورودی و تعداد "k" نمونه آموزشی ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود. مطابق شکل(۲- الف) شبکه دارای یک‌لایه ورودی و یک‌لایه مخفی و یک‌لایه خروجی است. در نهایت پس از سعی و خطا و ارزیابی نتایج، تعداد تکرار حل مسئله ۵۰۰۰ تکرار و تعداد نرون‌های لایه پنهان ۸۰ در نظر گرفته شد:

$$H_{ij}=g(\sum(W_{ji}X_{ik})+B_j) \quad (۳)$$

1. Extreme Learning Machine (ELM)
2. feed-forward
3. Analytical
4. Single layer feed forward neural network
5. Bias
6. Piecewise continuous function
7. Additive
8. Sigmoid

که $g(.)$ می‌تواند هر تابع فعال‌سازی غیرخطی پیوسته باشد، W_{ji} وزن نرون ورودی i ام و نرون لایه مخفی j ام، B_j ، بایاس نرون لایه مخفی j ام، X_{ik} ورودی نرون ورودی برای k امین نمونه آموزشی و H_{ik} ماتریس فعال‌سازی j امین نرون لایه مخفی برای k امین نمونه آموزشی است بطوریکه فعال‌سازی همه نرون‌های لایه مخفی برای نمونه‌های مورداستفاده در آموزش توسط این ماتریس ارائه می‌شود. در این ماتریس j ستون و k ردیف است. ماتریس H به‌عنوان ماتریس لایه مخفی خروجی شبکه عصبی بیان می‌شود. وزن‌های بین نرون‌های لایه مخفی و خروجی با استفاده از برازش حداقل مربعات برای مقادیر هدف در حالت آموزش در برابر خروجی‌های نرون – های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی، بکار برده می‌شود که معادل ریاضی آن را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$HB=T \tag{۴}$$

$$\beta=\left(\beta_1,\cdots,\beta_j\right)_{j\times 1} \tag{۵}$$

که β نشان‌دهنده وزن بین نرون لایه خروجی و نرون‌های لایه مخفی است و T بردار نشان‌دهنده مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزش است که به‌صورت معادله (۶) بیان می‌شود:

$$T=(T_1,\cdots,T_k)_{k\times 1} \tag{۶}$$

نهایتاً وزن‌ها را می‌توان از رابطه (۷) محاسبه کرد:

$$\beta=H'T \tag{۷}$$

که در آن:

$$H(\tilde{a},\tilde{b},\tilde{x})=\begin{bmatrix} G(a_1,b_1,x_1) & \cdots & G(a_L,b_L,x_L) \\ G(a_1,b_1,x_1) & \cdots & G(a_L,b_L,x_N) \end{bmatrix}_{N\times L} \tag{۸}$$

$$T=\begin{bmatrix} T_1^T \\ \vdots \\ T_L^T \end{bmatrix}_{L\times m} \quad \text{and} \quad T=\begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L\times m} \tag{۹}$$

که $\tilde{a}=a_1,\cdots,a_L;,\tilde{b}=b_1,\cdots,b_L,\tilde{x}=x_1,\cdots,x_L$ ، β بردار وزن بین نرون‌های لایه‌های مخفی و لایه پنهان و H' H' شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس H است. T بردار بین وزن‌های نمونه‌های آموزشی است. باتوجه‌به توضیحات ارائه شده می‌توان گفت که آموزش ELM شامل دو مرحله است: مرحله اول، اختصاص تصادفی وزن‌ها و بایاس‌ها به نرون‌های لایه پنهان و محاسبه خروجی لایه پنهان ماتریس H و مرحله دوم، محاسبه وزن‌های خروجی با استفاده از شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس H و مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزشی مختلف. روند آموزش جهت پیدا کردن ماتریس لایه پنهان (H)، سریع است بطوریکه از سرعت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار رایج مانند لونبرگ–مارکوآردت[1] که در آن هیچ نوع روالی از بهینه سازی غیرخطی را در بر نمی‌گیرد، برخوردار است. بنابراین زمان آموزش شبکه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

ماشین آموزش نیرومند با داده‌های پرت[2]

برای آموزش مدل داده‌ها را به بخش آموزش و تست تقسیم کردیم. تعداد کل داده‌ها ۷۸۰ داده بود که حدود ۷۰ درصد آن برای مرحله آموزش یا train و ۳۰ درصد آن برای مرحله آزمون با test در نظر گرفته شد. به منظور مدلسازی با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی همیشه داده‌های به‌صورت outlier وجود دارند و به دلیل اینکه عموما وجود چنین نمونه هایی در بسیاری از موارد به طبیعت موجود در مسئله برمیگردد، امکان حذف انها وجود ندارد؛ بنابراین، درصدی از کل خطای آموزش *(e)* را شامل می‌شود. به منظور برخورد با چنین داده هایی، وجود outliers با sparsity تعریف می‌شود. ژانگ[3] و لو[4] (۲۰۱۵) با دانش

1. Levenberg-Marquardt
2. Outlier Robust Extreme Learning Machine (ORELM)
3. Zhang
4. Luo

اینکه استفاده از l_0-norm ، sparsity را نسبت به l_2-norm بهتر منعکس می‌کند، جهت محاسبه ماتریس وزن خروجی (β)، به جای استفاده از l_2-norm، خطای آموزش (e) را به‌گونه‌ای در نظر می‌گیرند که sparse باشد.

$$\min_{\beta} C\|e\|_0+\|\beta\|_2^2 \text{subjecttoy-H}\beta=e \quad (۱۰)$$

$$\beta=[\beta_1,\ldots,\beta_N]^T$$

(β)، ماتریس وزن‌های خروجی است (w_o یا همان w_{output} است).

(یا در برخی منابع به این شکل نوشته می‌شود (w_o) ماتریس وزن‌های خروجی است):

$$\min_{w0} C\|e\|_0+\|w_0\|_2^2 \quad \text{subject to T-Hw}_0 \quad (۱۱)$$

رابطه فوق یک مسئله برنامه‌نویسی غیرمحدب[1] است. یکی از ساده‌ترین راه‌ها جهت حل این مسئله، نوشتن آن به‌صورت یک مسئله محدب قابل‌کنترل بدون ازبین‌رفتن ویژگی پراکندگی[2] است. ترم پراکنده یا *sparse* با استفاده از l_1-*norm* به دست می‌آید. جای‌گذاری l_{0-norm} با l_{1-norm} ، نه تنها منجر به حداقل سازی تحدب[3] (کم شدن تابع خطا) می‌شود بلکه وجود مشخصات پراکندگی یا وجود وقایع حدی (داده‌های نادر) را نیز تضمین می‌کند.

$$\min_{\beta}\|e\|_1+\frac{1}{C}\|\beta\|_2^2 subjecttoy-H\beta=e \quad (۱۲)$$

رابط فوق یک مسئله بهینه‌سازی محدب مقید[4] است به‌طوری‌که به طور کامل دامنه مناسب رویکرد تکمیل شده ضرب لاگرانژی[5] را تطبیق می‌کند.

$$L_\mu(e,\beta,\lambda)=\|e\|_1+\frac{1}{C}\|\beta\|_2^2+\lambda^2(y-H\beta-e)+\frac{\mu}{2}\|y-H\beta-e\|_2^2 \quad (۱۳)$$

که $\mu=2N/\|y\|_1$ بر پارامتر جریمه[6] دلالت دارد و $\lambda\in R^n$ بردار ضرب لاگرانژی است(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). جواب بهینه (e,β) و بردار ضرب لاگرانژی (λ) با استفاده از حداقل سازی تابع زیر طی فرایند تکراری، به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \&(e_{k+1},\beta_{k+1})=\arg\min_{e,\beta} L_\mu(e,\beta,\lambda)\ (a) \\ \lambda_{k+1}=\lambda_k+\mu(y-H\beta_{k+1}-e_{k+1})(b) \end{cases} \quad (۱۴)$$

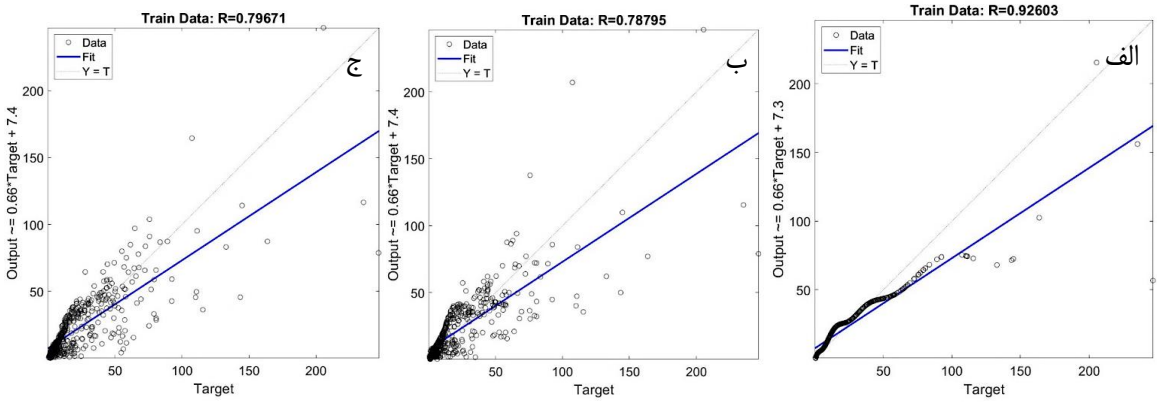
یافته‌های پژوهش

۱. پیش‌بینی دبی جریان رودخانه بر اساس هوش مصنوعی

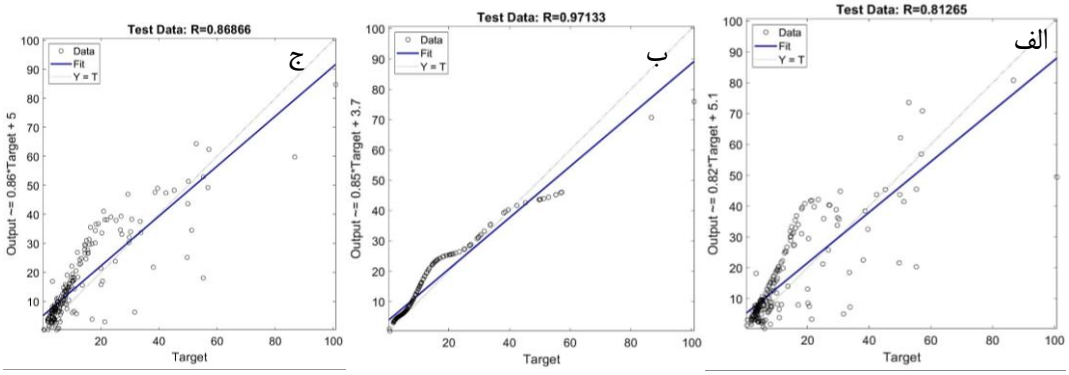
در این مطالعه از روش ORELM برای پیش‌بینی دبی جریان رودخانه استفاده شد. تا بتوان قابلیت جایگزینی این روش با مدل‌های پیچیده را بررسی کرد. این امر برای جایی که شرایط مطلوب برای به‌کارگیری مدل‌های عددی پیچیده برقرار نیست و یا اینکه اطلاعات کافی در دست نیست بسیار حائز اهمیت است. طوری که بتوان بر اساس تعداد ورودی‌های بسیار اندک، دبی جریان ورودی رودخانه را بادقت زیاد پیش‌بینی نمود. باتوجه‌به اهداف این تحقیق در این روش از داده‌های ماهیانه دبی در گام‌های زمانی قبل (t-1, t-2, t-3)، به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل استفاده شد. خروجی مدل نیز داده‌های دبی پیش‌بینی شده رودخانه قره‌سو در گام زمانی حاضر (t) در ایستگاه پل کهنه است. بهترین نتایج حاصل از اجرای هر کدام از داده‌های در نظر گرفته شده در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است. در تاخیرهای زمانی بیش از ۳ ماه مانند تاخیرهای ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه نتایج پیش‌بینی دارای دقت بسیار پایین بود. به همین خاطر به ارائه نتایج تاخیرهای ۱ تا ۳ ماه بسنده شد. بر اساس این شکل‌ها مدل ORELM با یک تأخیر در حالت اول یعنی گام زمانی (t-1) باتوجه‌به تمامی شاخص‌ها دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در مراحل آموزش و آزمایش است. پراکنش منظم‌تر و نزدیک‌تر نقاط در اطراف خط Y=X در مدل ORELM در حالت اول (t-1) نیز حاکی از

1. Non-convex programming
2. Tractable convex relaxation form without loss of the sparsity characteristic
3. Minimization convex
4. Constrained convex
5. Augmented Lagrangian (AL) multiplier
6. Penalty

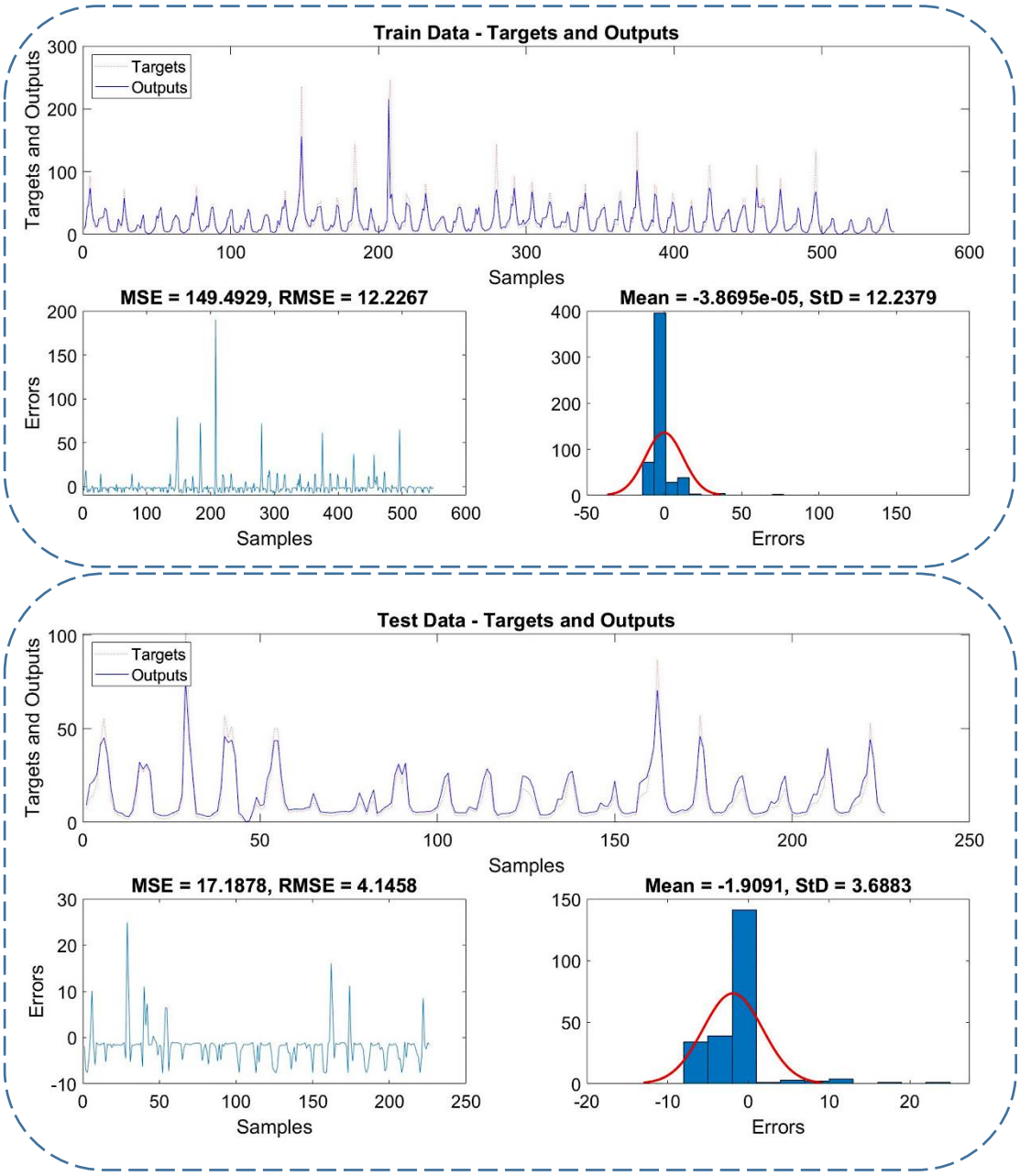
دقت بیشتر مقادیر پیش‌بینی این مدل در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است. براین‌اساس سری زمانی مقادیر پیش‌بینی شده دبی جریان رودخانه بر اساس مدل برتر ORELM (با تأخیر (t-1)) در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در مراحل آموزش و آزمایش در شکل (۵) نشان‌داده‌شده است. نمودار شکل ۵ خروجی‌های مدل در نرم‌افزار متلب است که مقادیر target مربوط به داده‌های مشاهداتی و مقادیر output مربوط به داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل است.



شکل ۳. نمایش گرافیکی پراکندگی نقاط در اطراف خط Y=X و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی با تاخیرهای t-۱، t-۲ و t-۳ (الف ، ب و ج) در مرحله آموزش مدل سازی



شکل ٤. نمایش گرافیکی پراکندگی نقاط در اطراف خط Y=X و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی با تاخیرهای t-1، t-2 و t-3 (الف ، ب و ج) در مرحله آزمایش مدل سازی



شکل ۵. گراف مقادیر پیش‌بینی شده دبی رودخانه بر اساس مدل برتر ORELM (با تاخیر (t-1)) در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در مراحل آموزش و تست

نتایج حاصل از کاربرد مدل هوش مصنوعی ORELM نشان می‌دهد این روش توانسته است در دوره آماری ۶۵ساله با کمترین میزان خطا در مراحل آموزش و آزمایش دبی ورودی رودخانه را پیش‌بینی نماید. مقدار ضریب همبستگی در مراحل train و test به ترتیب ۰.۹۲ و ۰.۹۷ است که تایید می‌کند این مدل دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی دبی جریان رودخانه دارد. مقدار RMSE در این روش در حالت تاخیر یک‌ماهه (t-1) در دو مرحله آموزش و آزمایش به ترتیب ۱۲/۲۲و ۴/۱۴ بود. مقدار RMSE در مرحله آزمایش با زمان تاخیرهای ۲ و ۳ به ترتیب در حدود ۹/۲۹ و ۸ بود که این مقدار نشان می‌دهد مدل ORELM در حالت اول بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های فراوان و بدون بهره گیری از فرآیند پیچیده مدلسازی بر اساس معادلات حاکم مقدار دبی جریان رودخانه را به درستی و بادقت زیاد پیش‌بینی نماید.

بحث

امکان پیش‌بینی دبی رودخانه برای یک دوره بلندمدت بر اساس حجم اطلاعات بسیار کم نسبت به مدل‌های عددی و تنها با استفاده از داده‌های جریان رودخانه در دوره‌های گذشته یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق است. در این حالت بدون نیاز به پارامترهای هواشناسی، خاک، زمین‌شناسی، اطلاعات مقاطع رودخانه‌ای و بدون نیاز به نقشه‌ها و نرم‌افزارهای پیچیده و بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای کالیبراسیون و صحت سنجی مدل‌های ریاضی، دبی جریان رودخانه بر اساس روش‌های هوش مصنوعی پیش‌بینی می‌گردد. این امر کمک بزرگی به متخصصین بخش منابع آب در حوضه‌های فاقد آمار یا اطلاعات پایه‌ای و نقشه‌های دقیق بوده و یا رودخانه‌هایی که با نقص آمار گسترده مواجه هستند می‌کند. زیرا با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با صرف زمان و هزینه بسیار کم اطلاعات مدیریتی بسیار ارزشمندی در خصوص پیش‌بینی دبی جریان رودخانه در سال‌های خشک و تر به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری

ارزیابی عملکرد مدل هوش مصنوعی (ORELM) در رودخانه قره‌سو ایستگاه پل کهنه نشان داد این مدل دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی دبی جریان رودخانه دارد. این روش توانسته است در دوره آماری ۶۵ساله با کمترین میزان خطا در مراحل آموزش و آزمایش دبی ورودی رودخانه را پیش‌بینی نماید. به‌طوری که مقدار RMSE در این روش در حالت تأخیر یک‌ماهه (t-1) در دو مرحله آموزش و آزمایش به ترتیب ۱۲/۲۲و ۴/۱۴ بود. مقدار RMSE در مرحله آزمایش با زمان تاخیرهای ۲ و ۳ به ترتیب در حدود ۹/۲۹ و ۸ بود که این مقدار نشان می‌دهد مدل ORELM در حالت اول بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های فراوان و بدون بهره گیری از فرآیند پیچیده مدلسازی بر اساس معادلات حاکم مقدار دبی جریان رودخانه را به درستی و بادقت زیاد پیش‌بینی نماید. نتایج تجربی نشان می‌دهد که روش توسعه‌یافته باتوجه‌به شاخص‌های مختلف ارزیابی عملکرد نسبت به روش‌های سنتی برتری دارد؛ بنابراین، یک مدل ماشین یادگیری افراطی تکاملی جدید و عملی با استفاده از هوش ازدحامی برای انجام کار پیچیده پیش‌بینی هیدرولوژیکی توسعه داده شده است. از سوی دیگر، کاربرد روش پیشنهادی ممکن است در عمل محدود باشد زیرا تعیین پارامترهای بهینه مدل شبکه عصبی در تئوری نسبتاً دشوار است. درحالی‌که تفاوت‌های زیادی در اطلاعات مشخصه عناصر هیدرولوژیکی در مکان‌های مختلف وجود دارد. باتوجه‌به توسعه سریع فناوری کامپیوتر، چشم انداز روش پیشنهادی را می توان با معرفی روش‌های محاسبات نرم موثرتر یا توسعه استراتژی های اصلاح شده قوی تر بهبود بخشید. علاوه بر این، ترکیبی از تکنیک پردازش سیگنال جدید توسعه یافته نیز می‌تواند برای بهبود عملکرد روش پیشنهادی استفاده شود. از جنبه دیگر، نتایج تأیید کرد که زمان تاخیر به‌عنوان یک ویژگی ورودی بر عملکرد مدل‌سازی مدل پیش‌بینی بسیار مهم است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آن‌هاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

گرگانی، شهرام.، بافکار، علی.، و فاطمی، سید احسان. (۱۳۹۶). پیش‌بینی استعداد آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص دراستیک و تحلیل سری‌های زمانی سالانه (مطالعه موردی: دشت ماهیدشت کرمانشاه) . *مجله سلامت و محیط زیست*، ۱۰(۳) ، ۳۱۷-۳۲۸. http://ijhe. ums.ac.ir/article-1-5962-fa.html

References

Bărbulescu, A., & Zhen, L. (2024). Forecasting the river water discharge by artificial intelligence methods. *Water*, *16*(9), 1248. https://doi.org/10.3390/w16091248

Darabi Cheghabaleki, S., Fatemi, S. E., & Hafezparast Mavadat, M. (2024). Enhancing spatial streamflow prediction through machine learning algorithms and advanced strategies. *Applied Water Science*, *14*(6), 110. http://dx.doi.org/10.1007/s13201-024-02154-x

Defontaine, T., Ricci, S., Lapeyre, C. J., Marchandise, A., & Le Pape, E. (2024). Real-time flood forecasting with Machine Learning using scarce rainfall-runoff data. *EGUsphere*, 1-32. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2621

Deo, R. C., Downs, N., Parisi, A. V., Adamowski, J. F., & Quilty, J. M. (2017). Very short-term reactive forecasting of the solar ultraviolet index using an extreme learning machine integrated with the solar zenith angle. *Environmental research*, *155*, 141-166. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.035

Fatemi, S. E., & Parvini, H. (2022). The impact assessments of the ACF shape on time series forecasting by the ANFIS model. *Neural Computing and Applications*, 34(15), 12723-12736. http://dx.doi.org/10.1007/s00521-022-07140-5

Gorgani, S., Bafkar, A., & Fatemi, S. (2017). Prediction of groundwater pollution potential using the DRASTIC index and annual time series analysis (case study: plain Mahidasht Kermanshah). *IJHE*, 10 (3), 317-328. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5962-en.html (In Persian)

Huang, G., Huang, G.-B., Song, S., & You, K. (2015). Trends in extreme learning machines: A review. *Neural Networks*, 61, 32-48. http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2014.10.001

Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., & Siew, C.-K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126

Morovati, R., & Kisi, O. (2024). Utilizing hybrid machine learning techniques and gridded precipitation data for advanced discharge simulation in under-monitored river basins. *Hydrology*, 11(4), 48. https://doi.org/10.3390/hydrology11040048

Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2024). AI-Based Rainfall-Runoff Modelling for Sustainable Water Management in Potteruvagu Watershed, India. In *Geospatial Technology to Support Communities and Policy: Pathways to Resiliency*, Springer, Springer, New York Sity, United states. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-52561-2_6

Salcedo-Sanz, S., Pastor-Sánchez, A., Prieto, L., Blanco-Aguilera, A., & García-Herrera, R. (2014). Feature selection in wind speed prediction systems based on a hybrid coral reefs optimization–Extreme learning machine approach. *Energy Conversion and Management*, 87, 10-18. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.041

Wang, E., Zhang, Y., Luo, J., Chiew, F. H. S., & Wang, Q. J. (2011). Monthly and seasonal streamflow forecasts using rainfall-runoff modeling and historical weather data. *Water Resources Research*, 47(5). https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010WR009922

Zhang, X., Wang, R., Wang, W., Zheng, Q., Ma, R., Tang, R., & Wang, Y. (2025). Runoff prediction using combined machine learning models and signal decomposition. *Journal of Water and Climate Change*, 16(1), 230-247. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.663

Razi University

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

An attitude on energy consumption management technologies in pumping stations

Afshin Uossef Gomrokchi[1]✉

1. Agricultural Engineering Research Department, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Qazvin, Iran. E-mail: a.gomrokchi@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 January 2025
Received in revised form 17 May 2025
Accepted 16 June 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
energy,
pumping station,
energy efficiency,
irrigation system,
energy audit.

ABSTRACT

Objective: In the present study, effective methods for managing energy consumption in pumping stations and pressurized irrigation systems have been examined.

Method: Energy consumption management methods have been examined in three general approaches: improving system operation methods, improving system operation methods and installing energy consumption management equipment, and improving pump startup methods.

Results: The results of the study show that from an economic perspective, the energy costs, repair and maintenance of a pumping system over its lifetime are up to 20 times its initial investment, and the use of energy management technologies, such as energy audits, will increase energy efficiency by 15 to 20 percent, operating the pump near the optimum operating point will reduce energy consumption by up to 35 percent, implementing automation systems in pumping stations will reduce energy consumption by up to 32 percent, and using variable speed pumps will reduce energy consumption in agricultural water pumping stations by up to 19 percent.

Conclusions: It is important to note that due to the wide range of factors involved in managing irrigation systems, it is necessary for farmers and operators to choose an appropriate and economical method for controlling energy consumption based on the existing conditions of the farm.

Cite this article: Uossef Gomrokchi, A. (2025). An attitude on energy consumption management technologies in pumping stations. *Advanced Technologies in Water Efficiency, 5* (3), 56-74.https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11955.1161

© The Author(s)
https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11955.1161

Publisher: Razi University.

Introduction

Sustainable development of pressurized irrigation methods can be one of the appropriate solutions to improve agricultural water use efficiency and improve irrigation efficiency. On the other hand, pressurized irrigation systems are mainly dependent on pumping stations, which are among the largest energy consumers, and their optimal design is very important, especially in terms of increasing the efficiency of pumping stations and controlling energy consumption. With the increasing use of pumps in the agricultural sector (especially with the development of pressurized irrigation systems in the last few decades), the discussion of controlling and adapting pumping station conditions to the hydraulic characteristics of the system has gained great importance in order to increase pumping station efficiency and manage energy consumption. The pumping station is the most important part of an irrigation system and is actually its heart. Any inefficiency in it will lead to a decrease in the efficiency of the system. Given its inherent characteristics, this part of the system requires a more systemic approach to increase efficiency.

The challenge of energy imbalance and power outages in agricultural water wells has made the issue of energy efficiency one of the key challenges in discussions related to pressurized irrigation systems today. Therefore, the study of energy-intensive processes, such as pumping stations, has become inevitable in order to improve the overall efficiency of irrigation systems (Shtabati Nejad and Razavi, 2015). Accordingly, today, saving water and energy consumption is one of the requirements for implementing and operating pressurized irrigation, and in recent years, with the approach to developing pressurized irrigation systems, the issue of energy saving has been prioritized in most countries (Fernandez et al., 2014). With the growth of technology and the application of new methods in pumping station management, it is possible not only to save energy consumption, but also to prevent the excessive wear and tear of electric pumps, and to achieve better performance of pumping stations and increase their lifetime.

Method

One of the best methods for improving the efficiency of energy consumption in irrigation is an energy audit in the irrigation system. Energy audit in the irrigation system is to find appropriate methods to determine energy saving opportunities, in which the state of energy distribution and consumption is examined and suggestions are made for improving energy consumption and efficiency in different parts of the system. In general, energy consumption management in pumping stations and pressurized irrigation systems is classified into 8 sections.

1- Optimal energy consumption by choosing the right option in designing pipelines and pumping systems

2- Optimal energy consumption by choosing the right option in arranging transmission lines and equipment systems

3- Optimal energy consumption by choosing pumps and electrical equipment of appropriate quality and standard

4- Optimal energy consumption by using soft starters and controlling motor speed in proportion to flow rate (energy) consumption

5- Controlling energy consumption and the health of the motor and transmission lines by evaluating the efficiency of the device and performance standards

6- Planning for the system's energy consumption cycle to distance the system's peak consumption from the peak consumption in the regional power grid, in order to avoid paying more money and reduce the risk of voltage drops and power outages

7- Optimal planning and consumption by performing telemetry and installing control equipment and preventing leaks

8- Optimal consumption by controlling energy-intensive devices through preventive maintenance and repairs.

Results

1- Improving the system operation methods

1-1-Pump operation at a point closer to its maximum efficiency point: One of the most important issues in agricultural water pumping stations is the non-compliance of the pumping station conditions with the operation standards. Compliance with pump operation standards will play a significant role in reducing energy consumption and increasing the operating life. For example, studies conducted in India indicate that despite the lack of information and training in the farming community, standardizing the design and operation of pumping stations has increased the operating efficiency of pumping systems by up to 20 percent

1-2-Modifying the layout of the irrigation network in accordance with the modification of the energy consumption pattern (identifying critical points of energy consumption in the system): The pressurized irrigation systems that have been implemented in the country over the past decades have been mainly targeted and implemented with the aim of promoting and improving the efficiency of water consumption. However, in conditions of limited and deficit energy resources, the implementation of pressurized irrigation systems cannot be implemented solely with the approach of water consumption management, and energy consumption management issues in the operation and design of the system will definitely be effective

2- Managing energy consumption by improving the system operation method (system automation): In another approach, the fastest solution for optimal water and energy management is to upgrade the existing irrigation systems from mechanization to automation which is possible by modifying the equipment while it is working and reducing the role of human labor. Automation of pressurized irrigation systems can be examined in three parts.

3- Energy consumption management by installing energy consumption management equipment and modifying the pump startup method: In the usual methods of operating a pumping station, the output flow rate is controlled using valves and the motor operates near full load regardless of the output value, which causes a lot of energy loss due to blockages. On the other hand, the conventional options for changing the pump curve performance, such as turning or replacing the pump impeller, throttling valve, and bypassing the flow, do not have the ability to control the pumps in real time in response to the existing variables, which also causes energy loss. It is obvious that the improper performance of the pumping station in a pressurized irrigation system from a technical point of view and the mismatch between the flow rate and flow pressure during the operation period and the actual amount required, causes unnecessary energy consumption, reduced efficiency, equipment wear and tear, and imposes economic costs.

Conclusions

In recent decades, the approach to analyzing energy consumption and examining solutions for reducing energy consumption in pressurized irrigation systems has received great attention in different parts of the world due to the economic benefits of energy savings. However, a review of existing policies and guidelines at the national level shows that the development of pressurized irrigation systems over the past three decades has been mainly focused on

improving water consumption efficiency, and energy efficiency issues have received less attention. However, in the coming years, it seems that energy deficit will be an important component in the development or lack of development of irrigation systems. Therefore, understanding the level of water and energy efficiency in agricultural and horticultural production in each region is the first step towards planning and management to increase the use of these resources. Also, presenting and applying energy consumption management methods in the agricultural sector will be considered one of the pillars of planning in the agricultural sector. This is despite the fact that due to the wide range of factors involved in managing irrigation systems, it is necessary to continuously develop various irrigation technologies and farmers are faced with different options in terms of energy saving in order to choose the appropriate and economical method of controlling energy consumption based on the existing conditions of the farm. Despite the existence of numerous and different technologies, there is a time gap between the continuous development of such technologies and the creation of standard and systematic guidelines for selecting the most appropriate technology. This issue can lead to the acceptance of inappropriate technologies and, as a result, the failure to use new technologies in irrigation systems. With the growth of technology and the application of new methods in pumping station management, it is possible to not only save energy consumption, but also prevent the severe wear and tear of electro pumps and, in addition to improving the performance of pumping stations, their lifespan can also be increased.

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Ethical Considerations

The author avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The author declare no conflict of interest.

Acknowledgements

We would like to thank the esteemed director of the Qazvin Provincial Agricultural Research and Education Center for their support in documenting the projects presented in this article.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

نگرشی بر فناوری‌های مدیریت مصارف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ

افشین یوسف گمرکچی [۱] ✉

۱. بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران. رایانامه: a.gomrokchi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
انرژی،
ایستگاه پمپاژ،
بازده مصارف انرژی،
سامانه آبیاری،
ممیزی انرژی.

چکیده

هدف: در تحقیق حاضر روش‌های مؤثر در مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ و سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار موردبررسی قرار گرفته است.

روش پژوهش: روش‌های مدیریت مصرف انرژی در سه رویکرد کلی اصلاح روش‌های بهره‌برداری سامانه، ارتقای شیوه بهره‌برداری سامانه و نصب تجهیزات مدیریت مصرف انرژی و اصلاح شیوه راه‌اندازی پمپ موردبررسی قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج بررسی انجام شده نشان‌دهنده آن است که از منظر اقتصادی هزینه‌های انرژی، تعمیر و نگهداری یک سامانه پمپاژ در طول عمر آن تا ۲۰ سرمایه‌گذاری اولیه آن است و بکارگیری فناوری‌های مدیریت مصرف انرژی همانند اعمال ممیزی انرژی، ۱۵ تا ۲۰ درصد موجب افزایش بازده انرژی، کارکرد پمپ در نزدیک نقطه بهینه کار تا ۳۵ درصد کاهش مصرف انرژی، پیاده‌سازی سامانه‌های اتوماسیون در ایستگاه پمپاژ تا ۳۲ درصد کاهش مصرف انرژی و بکارگیری پمپ دور متغیر تا ۱۹ درصد منجر به کاهش مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی خواهد شد.

نتیجه‌گیری: نکته حائز اهمیت آن است که به دلیل گستردگی عوامل دخیل در مدیریت سامانه‌های آبیاری، لازم است کشاورزان و بهره‌برداران در مبحث صرفه‌جویی انرژی بر اساس شرایط موجود مزرعه، دست به گزینش روش مناسب و اقتصادی در کنترل مصارف انرژی بزنند.

استناد: یوسف گمرکچی، افشین. (۱۴۰۴). نگرشی بر فناوری های مدیریت مصارف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ . *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۲)، ۵۶-۷۴.

http//doi.org/ 10.22126/atwe.2025.11955.1161

CC BY NC

© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

گرایش کشاورزان و بهره‌برداران به سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار و محدودیت‌ها و هزینه‌های مصرف انرژی در این سامانه‌ها، سبب افزایش اهمیت موضوع انرژی در مباحث آبیاری تحت‌فشار شده است. توسعه پایدار روش‌های آبیاری تحت‌فشار می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب در جهت بهبود بهره‌وری مصرف آب کشاورزی و بهبود راندمان آبیاری باشد. از طرفی سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار عمدتاً وابسته به ایستگاه‌های پمپاژ هستند که این ایستگاه‌ها از جمله بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند که پرداختن به طراحی بهینه آنها به‌ویژه ازنظر افزایش راندمان ایستگاه‌های پمپاژ و کنترل مصرف انرژی بسیار بااهمیت است. با افزایش کاربرد پمپ‌ها در بخش کشاورزی (به‌ویژه با توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در چند دهه اخیر)، بحث کنترل و تطبیق شرایط ایستگاه پمپاژ با مشخصات هیدرولیکی سامانه، به‌منظور افزایش بازده ایستگاه پمپاژ و مدیریت مصارف انرژی، اهمیت زیادی پیدا کرده است. ایستگاه پمپاژ مهم‌ترین بخش یک سامانه آبیاری و در واقع قلب آن محسوب شده که هرگونه ناکارآمدی در آن منجر به پایین آمدن بازده مجموعه خواهد شد. این بخش از سامانه باتوجه‌به خصوصیات ذاتی خود نیاز بیشتری به رویکرد سیستمیک، برای بالابردن بازده کاری دارد.

در محاسبات متداول مهندسی طراحی ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از نمودارهای منحنی مشخصه پمپ‌ها، منحنی مشخصه سامانه و با درنظرگرفتن این مسئله که سیستم در حالت پایدار است صورت می‌گیرد. این در حالی است که سامانه‌های انتقال سیال متأثر از عوامل دینامیکی بسیاری نظیر شرایط متفاوت بهره‌برداری، موقعیت ایستگاه‌های پمپاژ و تعداد پمپ‌های در حال کار است (ویسی و شمشادی، ۱۳۸۷). از سوی دیگر متغیر بودن فشار و دبی موردنیاز (نقطه کار) در محل ایستگاه پمپاژ باتوجه‌به الگوی کشت، مساحت اراضی در حال بهره‌برداری، تغییرات نیاز آبی در طول دوره فصل رشد، عدم تطابق ساعات آبیاری کشت‌های گوناگون و تعداد آبپاش‌های فعال از دیگر مشکلات عمده در بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ در سامانه‌های آبیاری است. برای رفع این مشکل به طور معمول در بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ روش‌هایی مانند شیر کنترل، افزایش تعداد پمپ‌ها و استفاده از کنارگذر[1] به کار گرفته شده است (نیک‌منش و زمانی، ۱۳۸۶). لیکن بعضی از این روش‌ها با معایبی همچون اتلاف انرژی بالا در دامنه تغییرات زیاد دبی، محدود بودن دامنه عملکرد و فاصله‌گرفتن نقطه‌کاری پمپ از نقطه بهینه کارکرد، همراه هستند. در روش‌های معمول بهره‌برداری وقتی پمپ در سرعت ثابت کار می‌کند، دبی خروجی با استفاده از شیرها، کنترل شده و موتور صرف‌نظر از مقدار خروجی در نزدیکی بار کامل کار می‌کند که باعث اتلاف انرژی زیادی توسط این مسدودکننده‌ها در سامانه می‌شود. ازاین‌رو شناخت هرچه بیشتر ابزار کنترلی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ و بررسی اثرات آن بر افزایش بازده ایستگاه‌های پمپاژ، اهمیت روزافزونی پیدا کرده است.

چالش ناترازی انرژی و قطعی برق چاه‌های آب کشاورزی باعث شده که موضوع بهره‌وری انرژی، امروزه یکی از چالش‌های کلیدی در مباحث مربوط به سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار قلمداد شود. ازاین‌رو بررسی فرآیندهای پرمصرف انرژی، مانند ایستگاه‌های پمپاژ، در راستای بهبود راندمان کلی سامانه‌های آبیاری اجتناب‌ناپذیر شده است (ثباتی نژاد و رضوی، ۱۳۹۴). براین‌اساس امروزه صرفه‌جوئی در مصرف آب و انرژی از الزامات اجرا و بهره‌برداری آبیاری تحت‌فشار است و در دهه‌های اخیر با رویکرد به توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، مبحث صرفه‌جوئی در انرژی در بیشتر کشورها اولویت یافته است (فرناندز و همکاران[2]، ۲۰۱۴). با رشد فنّاوری و به‌کارگیری روش‌های جدید در مدیریت ایستگاه پمپاژ این امکان وجود دارد که نه‌تنها در مصرف انرژی صرفه‌جوئی شود بلکه از استهلاک شدید الکتروپمپ‌ها نیز جلوگیری به‌عمل‌آمده و ضمن دستیابی به عملکرد بهتر ایستگاه‌های پمپاژ، طول عمر آنها نیز افزایش یابد.

1. Bypass
2. Fernandez Garcia et al

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱. تحلیلی بر بازده مصارف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی

تجهیزات دوار شامل پمپ‌ها، کمپرسورها و فن‌ها یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کننده‌های برق در بخش‌های صنعتی، خانگی، تجاری و کشاورزی هستند. بر اساس مطالعات انجام شده توسط US DOE [1] در کشورهای مختلف، مصرف برق پمپ‌ها (در تمامی کاربردها) به طور میانگین بین ۲۰ تا ۲۲ درصد کل برق تولیدی در جهان تخمین زده شده است. براین‌اساس و باتوجه‌به میزان بالای مصرف انرژی این تجهیزات، بررسی راندمان و نحوه مصرف انرژی و ارائه راهکارهای مدیریت مصرف انرژی در آنها بخش عمده‌ای از مطالعات انجام شده در راستای بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی است. به طور مثال مطالعاتی که روی بازده سامانه‌های پمپاژ در کشور امریکا در سال ۱۹۹۸ انجام‌گرفته است نشان از پتانسیل بالای این سامانه‌ها برای کاهش مصرف انرژی و به‌تبع آن کاهش چشمگیر در هزینه‌های کارکرد این سامانه‌ها دارد (گمار پور، ۱۳۸۲). در ادامه به مطالعات داخلی و خارجی دررابطه‌با این موضوع پرداخته شده است.

مطالعات داخلی

نتایج تحقیق فتحی مقدم و همکاران (۱۳۸۷)، بر اساس مقایسه متوسط راندمان بهره‌برداری ۴۱ فقره پمپ سانتریفیوژ آبرسانی کشاورزی با شاخص راندمان بهینه آنها در شرایط ایده‌آل نشان داد با رعایت استانداردهای طراحی و بهره‌برداری در این سامانه‌ها می‌توان سالانه ۳/۴۸ درصد در مصرف انرژی الکتریکی کل کشور صرفه‌جویی نمود.

رضوانی و همکاران (۱۳۸۹)، به بررسی بازده و مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی در مزارع استان همدان پرداختند. در این تحقیق مصرف انرژی، تلفات و بازده مجموع انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی دیزلی و برقی برخی از مزارع استان همدان بررسی شد. برای مقایسه عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی، از معیار بازده انرژی پمپاژ نبراسکا استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در ۱۷ مزرعه نشان داد که متوسط بازده مجموع انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ برقی ۴۶/۶ درصد و میانگین مصرف انرژی اضافی در ایستگاه پمپاژ برقی ۱۲/۱ کیلووات‌ساعت بوده است. در سامانه‌های آبیاری یکی از علل کاهش راندمان ایستگاه‌های پمپاژ، استفاده از روش‌های نامناسب تنظیم و کنترل جریان در زمان بهره‌برداری است.

مطالعات خارجی

فیپز و نیل[2] (۱۹۹۵)، در ۲۵ ناحیه از ایالت تگزاس ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری را آزمایش و گزارش کردند که حداقل، حداکثر و میانگین بازده مجموع انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ برقی به ترتیب ۱۷/۵، ۶۸/۵ و ۴۲/۶ درصد بوده است.

چاوز و همکاران[3] (۲۰۱۰)، با اندازه‌گیری میدانی، میانگین بازده موتورپمپ‌های الکتریکی را در ایالات مختلف امریکا بین ۴۵ تا ۵۵ درصد برآورد نموده و امکان دستیابی به بازده ۷۲ تا ۷۵ درصد را موردتأیید قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ۲۵ درصد انرژی الکتریکی استفاده شده در ایستگاه‌های پمپاژ تنها به دلیل پایین‌بودن بازده ایستگاه تلف می‌شود و از بعد اقتصادی هزینه‌های انرژی، تعمیر و نگهداری یک سامانه پمپاژ در طول عمر آن تا ۲۰ برابر سرمایه‌گذاری اولیه است.

آبادیا و همکاران[4] (۲۰۱۰)، با آنالیز انرژی مصرفی در ۲۲ ایستگاه پمپاژ در جنوب اسپانیا بازده انرژی مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ را ۵۳ درصد برآورد نموده‌اند. فرآیند ممیزی انرژی در این محدوده مطالعاتی نشان داد ۱۴ درصد امکان صرفه‌جوئی در مصرف انرژی وجود داشته است.

دیاز و همکاران[5] (۲۰۱۳)، با آنالیز ۱۵۰ ایستگاه پمپاژ در جنوب اسپانیا بازده ایستگاه‌های پمپاژ را ۵۸/۱ درصد برآورد نمودند.

1. United States Department of Energy
2. Fippes and Neal
3. Chávez et al
4. Abadia et al
5. Diaz et al

مورا و همکاران[1] (۲۰۱۳)، با آنالیز ۲۲ ایستگاه پمپاژ بازده ایستگاه‌های پمپاژ را ۵۰/۲ درصد برآورد کرده‌اند.

۲. پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی

مطالعات داخلی

رحیمی و نادری (۱۳۸۹)، به بررسی و مقایسه میزان بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنترل ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از سیستم خودکارسازی و روش‌های کلاسیک راه اندازی پرداختند. در این تحقیق که در ایستگاه پمپاژ شبکه آبیاری تحت‌فشار اراضی شرق گرگر انجام شد، میزان بهینه‌سازی مصرف انرژی ایستگاه‌های پمپاژ تأمین آب و تقویت فشار اراضی شرق گرگر مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که ۳۲ درصد کاهش مصرف انرژی در صورت استفاده از سامانه‌های خودکار بجای روش‌های معمول راه‌اندازی قابل حصول بوده است.

رئیسیان امیری و پرورش ریزی (۱۳۹۳)، در تحقیقی به ارزیابی طراحی پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در دشت هارکله – لالی پرداختند. در این تحقیق اثرات جایگزینی پمپ دور متغیر با پمپ دور ثابت روی هیدرولیک طرح، مصرف انرژی و بازده پمپ‌ها ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که با به‌کارگیری پمپ دور متغیر در پمپاژ این طرح، بازده کاری پمپ‌ها می‌تواند تا ۱۰ درصد افزایش و میزان مصرف انرژی تا ۴۹ درصد در سال نسبت به طراحی متداول کاهش یابد.

دلفان آذری و پرورش ریزی (۱۳۹۴)، با درنظرگرفتن روش‌های مختلف کنترل دبی در یک سامانه آبیاری، مقدار مصرف انرژی در شیوه‌های مختلف بهره‌برداری را مقایسه نمودند. نتایج تحلیل انرژی مصرفی نشان داد، بالاترین بازده انرژی در استفاده از پمپ‌های دور متغیر بوده که تلفات انرژی را ۴۴ تا ۵۴ درصد کاهش داده است.

گمرکچی و پرورش ریزی (۱۳۹۷) باتوجه‌به قابلیت‌های سامانه‌های پمپاژ دور متغیر در تطبیق با شرایط مختلف بهره‌برداری، استفاده از پمپ‌های دور متغیر در یک کشت و صنعت ۸۵ هکتاری زیتون واقع در استان قزوین، را موردبررسی قرار دادند. در این راستا مصارف انرژی در طول دوره بهره‌برداری ده‌ساله سامانه، تحلیل شده است. نتایج تحقیق نشان‌دهنده آن است که میزان انرژی الکتریکی مصرفی با به‌کارگیری پمپ دور متغیر، در مقایسه با روش بهره‌برداری مرسوم با پمپ دورثابت تا ۱۸ درصد کاهش‌یافته است.

مطالعات خارجی

دیاز و همکاران (۲۰۰۹)، سناریوهای مختلف ذخیره‌سازی انرژی در سامانه‌های آبیاری که بر اساس فشار موردنیاز تنظیم شده‌اند را موردبررسی قرار دادند. آنها منطقه‌ای در جنوب اسپانیا را انتخاب نموده و آن منطقه را تحت ۴ سناریو مدیریتی متناوب که بر اساس سطح‌های مختلفی از نیاز آبی و چگونگی فراهم‌کردن این نیاز آبی، مطرح شده بود، موردبررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET استفاده نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از روش‌هایی مثل تنظیم دینامیک فشار و منطقه‌بندی، کاهش اساسی در توان موردنیاز ایستگاه‌های پمپاژ، به همراه ذخیره‌سازی انرژی به میزان بیش از ۲۷ درصد را باعث شده است. این نوع سامانه‌ها که به‌صورت نیمه‌خودکار و بر اساس نیاز کار می‌کنند، به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی و کار در مناطقی پیشنهاد می‌شوند که منطقه به‌صورت همگن آبیاری نمی‌شود. در این شرایط استفاده از پمپ‌های دور متغیر می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی شده و شرایط مساعدتری را برای مصرف آب و انرژی فراهم کند.

خدرا و همکاران[2] (۲۰۱۶)، مصارف انرژی در یک سامانه آبیاری تحت‌فشار در جنوب ایتالیا را موردبررسی قرار دادند. نتایج تحلیل انرژی مصرفی در روش‌های مختلف بهره‌برداری سامانه آبیاری نشان داد، با استفاده از قابلیت‌های پمپ دور متغیر امکان صرفه‌جوئی در مصارف انرژی تا ۴۹ درصد امکان‌پذیر بوده است.

1. Vera et al
2. Khadra et al

۳. پیچیدگی مدیریت توأمان منابع آب و انرژی

به‌طورکلی، تغییر روش آبیاری از روش سطحی و غرقابی به روش آبیاری تحت‌فشار، در کاهش تلفات آب و تلفات نفوذ مؤثر بوده، لیکن در تغییر روش آبیاری، مصارف انرژی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و مدیریت سامانه نیز افزایش‌یافته است.

تحقیقات جکسون و همکاران[1] (۲۰۱۰)، در یک منطقه در جنوب استرالیا نشان داد با تغییر روش آبیاری سطحی (منبع تأمین آب آن آب‌های سطحی بوده است) به آبیاری تحت‌فشار مصرف آب ۱۰ تا ۶۶ درصد کاهش‌یافته و مصرف انرژی نیز تا ۱۶۳ درصد افزایش‌یافته است. این نتایج در منطقه‌ای که منبع تأمین آب آن وابسته به آب‌های زیرزمینی بوده باعث افزایش ۱۲ تا ۴۴ درصدی مصرف انرژی شده است.

کورکولس و همکاران[2] (۲۰۱۶)، هزینه‌های انرژی مصرفی در یک سامانه آبیاری بارانی در منطقه جنوب اسپانیا را برآورد نموده و نتیجه گرفتند که ۴۵ درصد هزینه نگهداری، مدیریت و بهره‌برداری یک سامانه آبیاری بارانی مرتبط با هزینه انرژی مصرفی بوده است. به دلیل افزایش مصرف انرژی ناشی از توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، میزان تقاضای انرژی نیز رشد چشمگیری داشته است.

کرومیناس[3] (۲۰۱۰)، در تحقیقی به بررسی افزایش مصارف انرژی با توسعه سامانه‌های آبیاری در اسپانیا پرداخت. نتایج تحقیق بیانگر آن است که با کاهش ۲۱ درصدی مصرف آب از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۷، میزان مصرف انرژی ۶۵۷ درصد رشد داشته است.

دیاز و همکاران (۲۰۱۱)، این مسئله را به‌عنوان پارادوکس مدرن‌سازی سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار نام برده‌اند. تحقیقی که توسط آنها در منطقه آندلس اسپانیا انجام گرفت نشان‌دهنده آن است که علی‌رغم مدیریت بهینه منابع آبی هم راستا با توسعه سامانه‌های آبیاری، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از سیستم مدرن موجود نیز در حدود ۴۰۰ درصد افزایش‌یافته است، که این امر لزوم مدیریت دقیق منابع آبی و کنترل مصارف انرژی در سامانه‌های مدرن آبیاری تحت‌فشار را دوچندان نموده است. آنها متوسط مقدار انرژی موردنیاز برای پمپاژ هر مترمکعب آب را ۰/۴۱ کیلووات‌ساعت و میانگین انرژی مصرفی جهت آبیاری تحت‌فشار هر هکتار را ۱۰۰۰ کیلووات‌ساعت برآورد نمودند.

روش پژوهش

یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود کارایی مصرف انرژی در آبیاری، ممیزی انرژی در سامانه آبیاری است. ممیزی انرژی در سامانه آبیاری، عبارت است از یافتن روش‌های مناسب برای تعیین فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی که در آن وضعیت توزیع و مصرف انرژی بررسی می‌شود و پیشنهادهایی برای بهبود مصرف و کارآیی انرژی در بخش‌های مختلف سامانه ارائه می‌شود (فرخی و پرورش‌ریزی، ۱۴۰۲). به‌طورکلی مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ و سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در ۸ بخش رده‌بندی شده است که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. روش‌های مدیریت بهینه مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی

ردیف	روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی
۱	انتخاب گزینه مناسب در طراحی خطوط لوله و سیستم پمپاژ
۲	انتخاب گزینه مناسب در آرایش خطوط انتقال و سیستم تجهیزات
۳	انتخاب پمپ و تجهیزات برقی باکیفیت مناسب و استاندارد
۴	کنترل مصرف انرژی و سالم‌بودن موتور و خطوط انتقال از طریق ارزیابی بازده کارکرد دستگاه و استاندارد عملکرد
۵	استفاده از دستگاه‌های راه‌انداز نرم[4] و کنترل دور موتور به نسبت مصرف دبی (انرژی)
۶	برنامه‌ریزی برای سیکل مصرف انرژی سیستم برای فاصله‌گذاری بین پیک مصرف سیستم با پیک مصرف در شبکه برق منطقه
۷	برنامه‌ریزی و مصرف بهینه با انجام تله‌متری و نصب تجهیزات کنترلی و جلوگیری از نشت
۸	مصرف بهینه با کنترل دستگاه‌های انرژی بر به روش تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه

1. Jackson et al
2. Corcoles et al
3. Corominas
4. Soft starter

در ذیل به برخی از روش‌های مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی اشاره شده است.

۱. اصلاح روش‌های بهره‌برداری سامانه

کارکرد پمپ در نقطه‌ای نزدیک‌تر به نقطه بیشینه بازده آن

یکی از مهم‌ترین مسائل در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی، عدم تطابق شرایط ایستگاه پمپاژ با استانداردهای بهره‌برداری است. رعایت استانداردهای کارکرد پمپ نقش بسزایی در کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر بهره‌برداری خواهد داشت. به طور نمونه مطالعات انجام شده در کشور هندوستان بیانگر آن است که علی‌رغم کمی اطلاعات و آموزش در جامعه کشاورزان، استاندارد نمودن طراحی و بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ موجب افزایش بازده بهره‌برداری از سامانه‌های پمپاژ تا ۲۰ درصد شده است (یوسف گمرکچی، ۱۳۹۶). بررسی استانداردهای بین‌المللی در خصوص ایستگاه‌های پمپاژ نشان‌دهنده آن است که ارائه دستورالعمل در خصوص بهترین نقطه‌کاری پمپ (بهترین نقطه‌کاری پمپ ظرفیتی از پمپ در حداکثر قطر پروانه است که در آن بهترین عملکرد هیدرولیکی، مکانیکی و بهینه‌ترین مصرف انرژی را دارد)، بسیار موردتوجه بوده است. ازآنجاکه بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک سیستم پمپاژ، نهایتاً منجر به کارکردن پمپ در نقطه‌ای نزدیک‌تر به نقطه بیشینه بازده آن می‌شود. تعیین محدوده کارکرد مناسب پمپ، مهم‌ترین هدف‌گذاری در ارائه استانداردهای بین‌المللی بوده است. استاندارد ASME-B73 بازه ۸۰ تا ۱۱۰ درصد بهترین نقطه کارکرد را توصیه نموده است (یوسف گمرکچی، ۱۳۹۶).

اصلاح جانمایی شبکه آبیاری متناسب با اصلاح الگوی مصرف انرژی (شناخت نقاط بحرانی مصرف انرژی در سامانه)

سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار که طی دهه‌های گذشته در سطح کشور اجرا و پیاده‌سازی شده‌اند عمدتاً باهدف ارتقای و بهبود کارآیی مصرف آب هدف‌گذاری و اجرا شده لیکن در شرایط محدودیت و کسری منابع انرژی نمی‌توان اجرای سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار را صرفاً با رویکرد مدیریت مصرف آب پیاده‌سازی نمود و مباحث مدیریت مصرف انرژی در شیوه بهره‌برداری و طراحی سامانه قطعاً اثرگذار خواهد بود (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۳). در این رویکرد مدیریتی اصلاح الگوی مصرف انرژی، نحوه جانمایی شبکه آبیاری در شدت مصرف انرژی سامانه آبیاری مؤثر خواهد بود. در این راستا علاوه بر نحوه جانمایی شبکه آبیاری مواردی همچون ناحیه‌بندی واحدهای آبیاری و تشخیص نقاط بحرانی مصرف انرژی، از راهکارهای مدیریت مصرف انرژی در سامانه‌های آبیاری است. نقاط بحرانی در شبکه آبیاری مهم‌ترین نقطه اشتراک بین مزرعه و ایستگاه پمپاژ در سامانه آبیاری تحت‌فشار است؛ لذا از منظر طراحی سامانه آبیاری متناسب با محدودیت مصارف انرژی، باید برای آن برنامه‌ریزی انجام شود (بلود و همکاران[1]، ۲۰۲۰). نتایج تحقیقات انجام شده نشان‌دهنده آن است که هزینه اضافی انجام شده به‌منظور تأمین فشار کارکرد در منطقه بحرانی مصرف انرژی در طول دوره بهره‌برداری سامانه، افزایش عملکرد محصول را جبران نکرده است (یوسف گمرکچی، ۱۳۹۶). در شکل (۱) نمونه‌ای از یک باغ زیتون در استان قزوین نشان‌داده‌شده که اختلاف ارتفاع بین دونقطه پمپاژ آب در باغ مذکور بیش از ۸۰ متر بوده، فلذا باتوجه‌به آبیاری نقطه بحرانی مصرف انرژی در این باغ (محدوده بالاترین نقطه پمپاژ آب)، لازم است کلیه تجهیزات ایستگاه پمپاژ متناسب با این محدوده طراحی و اجرا شود. همچنین لازم است پمپ در بازه وسیعی از محدوده ارتفاعی آب را پمپاژ نماید که این امر منجر به‌دور شدن پمپ از نقطه بیشینه بازده خواهد شد.

1. Belaud et al

شکل ۱. نمونه ای از یک باغ با بازه ارتفاعی وسیع جهت پمپاژ آب (وجود نقطه بحرانی پمپاژ از منظر مصارف انرژی)

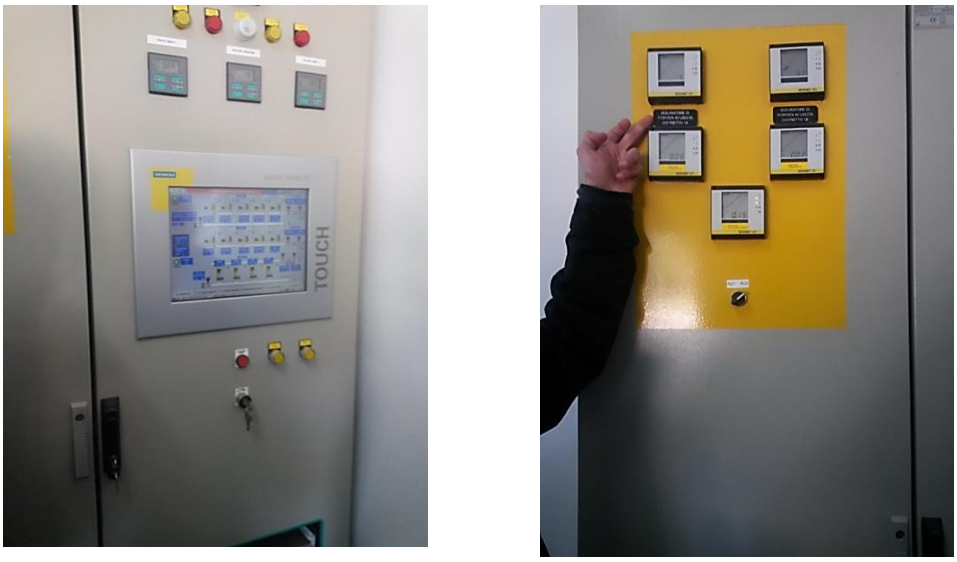
۲. مدیریت مصرف انرژی با ارتقای شیوه بهره‌برداری سامانه (خودکارسازی سامانه)

در رویکرد دیگر سریع‌ترین راه‌حل برای مدیریت بهینه آب و انرژی، ارتقای وضع موجود سامانه‌های آبیاری از سطح مکانیزاسیون به خودکارسازی عنوان شده است (بومن و همکاران[1]، ۲۰۰۶)، که این مسئله از طریق اصلاح تجهیزات در حال کار و کم‌کردن نقش نیروی انسانی امکان‌پذیر است. خودکارسازی سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در سه بخش قابل‌بررسی است.

- خودکارسازی برای برآورد نیاز آبی گیاه و تعیین زمان آبیاری
- خودکارسازی در خطوط لوله شبکه برای کنترل توزیع جریان آب
- خودکارسازی در ایستگاه پمپاژ و فیلتراسیون

در این راستا مهم‌ترین هدف اعمال روش‌های کنترلی در ایستگاه‌های پمپاژ، کنترل حجم آب مصرفی باتوجه‌به سناریوهای مصرف در طول دوره بهره‌برداری است. نکته حائز اهمیت آن است که گستره خودکارسازی در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار بسیار متنوع بوده و می‌تواند در ایستگاه‌های پمپاژ، ادوات کنترل آبیاری در سطح مزرعه، سامانه‌های انتقال و توزیع آب در سطح مزرعه اعمال گردد. در شکل (۲) نمونه‌ای از تابلو فرمان یک ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی با قابلیت کارکرد به صورت خودکار نشان‌داده‌شده است.

1. Boman et al



شکل ۲. نمونه‌ای از خودکار سازی یک ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی

۳. مدیریت مصرف انرژی با نصب تجهیزات مدیریت مصرف انرژی و اصلاح شیوه راه‌اندازی پمپ

در روش‌های معمول بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ، دبی خروجی با استفاده از شیرها، کنترل شده و موتور صرف‌نظر از مقدار خروجی در نزدیکی بار کامل کارکرده که این روش بهره‌برداری باعث اتلاف انرژی زیادی توسط مسدودکننده‌ها می‌شود. از سوی دیگر گزینه‌های مرسوم جهت تغییر عملکرد منحنی پمپ نظیر تراش و یا تعویض پروانه پمپ، شیر خفه کن، کنارگذر کردن جریان، توانایی کنترل لحظه‌به‌لحظه پمپ‌ها در پاسخ به متغیرهای موجود را نخواهد داشت که این مسئله نیز باعث تلفات انرژی خواهد شد (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۳). بدیهی است که عملکرد نامناسب ایستگاه پمپاژ در یک سامانه آبیاری تحت‌فشار از نظر فنی و عدم تناسب دبی و فشار جریان در طی دوره بهره‌برداری با مقدار واقعی موردنیاز، باعث مصرف بی‌مورد انرژی، کاهش بازده، فرسودگی تجهیزات و تحمیل هزینه‌های اقتصادی مرتبط نیز خواهد شد. ازاین‌رو تطبیق شرایط بهره‌برداری در یک سامانه آبیاری تحت‌فشار، با شرایط ایستگاه پمپاژ امری ضروری است. لذا باتوجه‌به ماهیت برخی از فرآیندها نظیر تغییرات دبی در طول دوره بهره‌برداری و لزوم تأمین فشار یکسان در یک سامانه آبیاری تحت‌فشار، به‌کارگیری سامانه‌های کنترلی در ایستگاه پمپاژ لازم است. در شکل (۳) نمونه‌ای از تلفات انرژی به دلیل استفاده از روش کنارگذر جریان جهت کنترل دبی در محل ایستگاه پمپاژ نشان‌داده‌شده است.

شکل ۳. نمونه‌ای از تلفات انرژی در ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی به دلیل شیوه کنترل جریان در محل ایستگاه پمپاژ

از سوی دیگر در ایستگاه‌های پمپاژی که از موتورهای الکتریکی برای نیروی محرکه پمپ‌ها استفاده می‌شود، شیوه راه‌اندازی پمپ نیز در مدیریت مصرف انرژی از اهمیت به سزایی برخوردار است، به‌نحوی‌که در برخی موارد به‌کارگیری شیوه اشتباه راه‌اندازی

پمپ، منجر به اتلاف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب خواهد شد. روش معمول که تقریباً در اغلب ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی جهت راه‌اندازی پمپ‌ها استفاده شده و منجر به اتلاف انرژی زیادی می‌گردد، راه‌اندازی به‌صورت ستاره – مثلث است. در این روش راه‌اندازی برای محدودکردن موج جریان راه‌اندازی، موتورهای القایی بزرگ در ولتاژ پایین‌تری راه‌اندازی می‌شوند (روش ستاره) و بعد از آن ولتاژ کامل تغذیه هنگامی اعمال می‌شود که الکتروموتور به نزدیکی سرعت نامی خود رسیده باشند (روش مثلث) (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۳). به این روش راه‌اندازی پمپ اصطلاحاً روش ستاره – مثلث گفته می‌شود. شکل (۴) نمونه‌ای از روش راه‌اندازی ایستگاه پمپاژ، به روش ستاره – مثلث را نشان داده است.

شکل ٤. نمونه‌ای از راه‌اندازی ایستگاه پمپاژ به روش ستاره – مثلث

بنابراین، مدیریت مصرف انرژی با نصب تجهیزات مدیریت مصرف انرژی و اصلاح شیوه راه‌اندازی پمپ یکی از مهم‌ترین راهکارها جهت مدیریت مصرف انرژی است. در ذیل به برخی از این تجهیزات اشاره شده است.

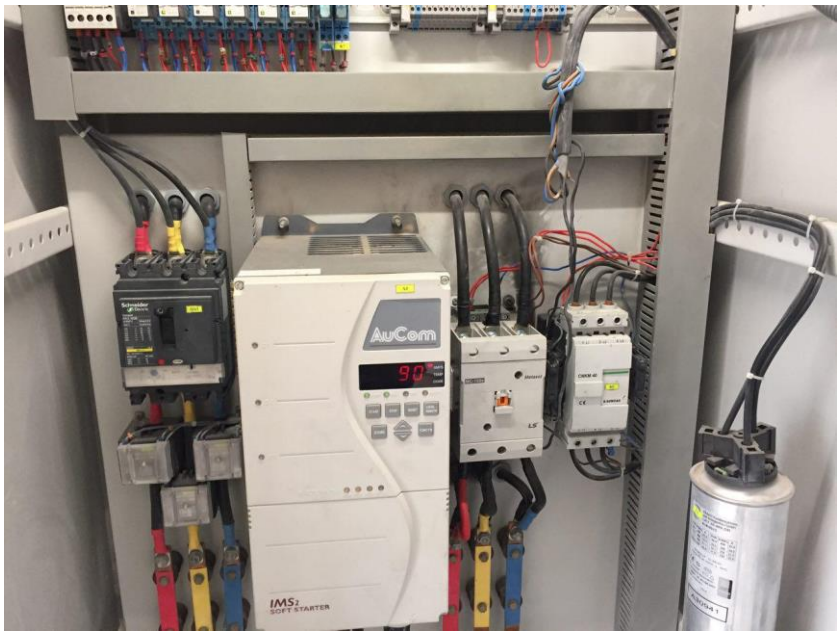
خازن (جبران‌سازی توان راکتیو)

ساختار الکتروموتورها به‌گونه‌ای است که جهت راه‌اندازی نیاز به جریان مغناطیس شوندگی دارند که در نتیجه به مصرف توان راکتیو (غیرمفید) جهت راه‌اندازی خود نیاز دارند. در حال حاضر به‌عنوان یک راه‌حل متداول از خازن‌ها به‌عنوان جبران‌ساز توان مصرفی استفاده می‌گردد. در مصرف‌کننده‌های باقدرت بالا، توان راکتیو مصرفی توسط کنتور اندازه‌گیری و بهای آن از مصرف‌کننده دریافت می‌گردد. از سوی دیگر وجود قدرت راکتیو باعث گرم‌شدن سیم‌ها و کابل‌های انتقال برق نیز خواهد شد؛ لذا در راستای صرفه‌جوئی انرژی و کاهش هزینه‌های برق مصرفی و برطرف‌شدن مشکل یاد شده باید توان راکتیو مصرفی کاهش داده شود. برای رفع این مشکل بهره‌برداران پس از بررسی مستمر قبض برق مصرفی، در صورت وجود توان راکتیو در قبض برق باید از خازن یا بانک خازن استفاده نموده و یا در صورت وجود خازن در محل تابلو برق، می‌بایست اقدام به تعویض آن نمایند (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۳). خازن‌ها تولیدکننده توان راکتیو بوده و می‌توانند توان راکتیو موردنیاز الکتروموتور را تأمین نمایند؛ بنابراین در ایستگاه‌های پمپاژ باتوجه‌به تعداد الکتروپمپ‌ها و ضریب قدرت هر یک از الکتروپمپ‌ها، باید بانک خازن موردنیاز محاسبه و نصب گردد. در شکل (۵) نمونه‌ای از یک تابلو برق ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی تجهیز شده به بانک خازن نشان‌داده‌شده است.

شکل ۵. نمونه‌ای از تابلو برق ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی تجهیز شده به بانک خازن

راه‌انداز نرم[1]

در روش‌های راه‌اندازی نرم، برخلاف روش‌های معمول راه‌اندازی ایستگاه پمپاژ (روش ستاره – مثلث)، موتور به‌آهستگی شروع بکار می‌کند و این شروع آهسته باعث حذف شوک‌های مکانیکی و الکتریکی در ایستگاه پمپاژ می‌شود. اساس کارراه‌اندازهای نرم به‌این‌ترتیب است که ابتدا الکتروموتور با ولتاژ پایین استارت شده و سپس ولتاژ با یک شیب مشخص افزایش‌یافته تا به حد ولتاژ نامی الکتروموتور برسد. به‌عبارت‌دیگر این سیستم با اعمال ولتاژ پایین، جریان راه‌اندازی و گشتاور راه‌اندازی پایین ایجاد خواهد کرد. فلذا در این روش راه‌اندازی، الکتروموتور به‌صورت نرم راه‌اندازی شده و شدت‌جریان راه‌اندازی به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کاهش خواهد داشت (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۳). شکل (۶) نمونه‌ای از تابلو برق مجهز به سافت استارتر، در یک ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی را نشان داده است.

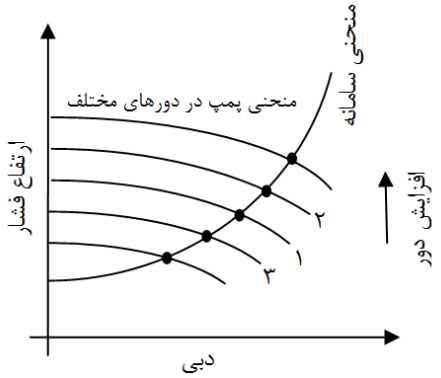


شکل ٦. نمائی از تابلو برق ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی تجهیز شده به راه‌انداز نرم

1. Soft starter

درایو[1]

درایو با ایجاد تغییر فرکانس ورودی در موتور الکتریکی، علاوه بر تثبیت فشار در ایستگاه پمپاژ، یکی از مهم‌ترین سامانه‌هایی است که به‌صورت هوشمند این قابلیت را دارا است تا با تغییرات دبی، فشار کارکرد شبکه را مطابق منحنی که از قبل برای سامانه تعریف شده است، تغییر دهد. درایو یک سیستم برای کنترل‌کردن سرعت چرخش یک موتور با کنترل فرکانس تغذیه اعمال شده به موتور الکتریکی است که قادر است دور موتور را از صفر تا چندین برابر دور نامی موتور و به طور پیوسته تغییر دهد. درایوهای الکترونیکی علاوه بر اینکه در محدوده وسیعی از سرعت بادقت بسیار خوبی کار می‌کنند، توانایی بهبود ضریب توان و کاهش جریان راه‌اندازی را دارند (یوسف گمرکچی و پرورش‌ریزی، ۱۳۹۷). ازآنجاکه عملکرد سرعت متغیر پمپ، بر اساس قوانین تشابه[2]، دبی را با توان یک و ارتفاع را با توان دو و توان مصرفی را با توان سه تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، ازاین‌رو یک پمپ در دورهای مختلف منحنی عملکرد متفاوتی خواهد داشت که این امر باعث افزایش انعطاف‌پذیری ایستگاه پمپاژ در شرایط مختلف بهره‌برداری و ذخیره انرژی در یک سامانه آبیاری تحت‌فشار خواهد شد. براین‌اساس با تغییر سرعت چرخش پروانه پمپ، منحنی مشخصه پمپ نیز تغییر خواهد نمود. باتوجه‌به شکل (۷) اگر منحنی سامانه را در نظر بگیریم و فرض کنیم که منحنی (۱)، منحنی اصلی پمپ باشد، در این صورت نقطه عملکرد پمپ همان نقطه موردنظر بر روی منحنی سامانه که نقطه دبی و فشار موردنیاز است، است. حال فرض کنیم که دبی و فشار موردنیاز سامانه افزایش پیدا کند، در این صورت پمپ دور متغیر نیز با افزایش دور، منحنی جدیدی را تولید خواهد نمود و منحنی پمپ در موقعیت (۲) و اگر نیاز شبکه کاهش یابد، در این صورت منحنی پمپ با کاهش دور در موقعیت (۳) قرار خواهد گرفت. به‌این‌ترتیب با تغییر دور پمپ، منحنی مشخصه جدید به وجود خواهد آمد. براین‌اساس در پمپ دور متغیر، باتوجه‌به مقدار دبی و فشار موردنیاز در منحنی سامانه، منحنی پمپ با استفاده از روابط تشابه، خود را بر آن نقطه منطبق خواهد نمود. در شکل (۸) نمونه‌ای از یک سامانه کنترلی پمپ دور متغیر در ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی نشان‌داده‌شده است.



شکل ۷. نمای شماتیک از نحوه تغییر دور در پمپ‌های دور متغیر متناسب با نیاز سامانه

1. Drive
2. Affinity Laws

شکل ۸. نمونه‌ای از یک سامانه کنترلی پمپ دور متغیر در ایستگاه پمپاژ آب کشاورزی(شهرستان بیله سوار مغان)

استفاده از درایو پاسخگویی به محدوده وسیع‌تری از نیازهای بهره‌برداری سامانه را در کنار کنترل مصرف انرژی امکان‌پذیر خواهد نمود. به‌نحوی‌که اگر در یک شبکه آبیاری ترکیبی از کشت‌های مختلف وجود داشته باشد باتوجه‌به قابلیت تغییر نقطه کارکرد پمپ دور متغیر، امکان اعمال هیدرو مدول‌های مختلف در مدیریت متمرکز ایستگاه پمپاژ وجود خواهد داشت. فلذا مدیریت انرژی به‌واسطه‌ی کنترل دور الکتروپمپ و قرارگرفتن در نقطه کار با نصب درایو میسر است (یوسف گمرکچی و پرورش ریزی، ۱۳۹۷).

یافته‌های پژوهش

هرچند مباحث بهره‌برداری سامانه‌های آبیاری تا حدودی موردتوجه طراحان و کارشناسان بوده، لیکن کشاورزان در اغلب موارد شناخت کافی از مباحث اولیه بهره‌برداری ایستگاه پمپاژ ندارند که این امر منجر به تحمیل هزینه‌های سنگین، در طی دوره بهره‌برداری سامانه خواهد شد. به‌طور نمونه از بعد اقتصادی هزینه‌های انرژی، تعمیر و نگهداری یک سامانه پمپاژ در طول عمر آن تا ۲۰ سرمایه‌گذاری اولیه آن برآورد شده است (چاوز و همکاران، ۲۰۱۰). این امر در حالی است که امروزه با توسعه فناوری در بخش آبیاری، اجزاء وابسته به آن همانند ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی، دستخوش تغییر شده‌اند. ورود راه‌اندازهای نرم، پمپ‌های دور متغیر، تجهیزات خودکارسازی ایستگاه‌های پمپاژ، تجهیزات کاهش توان راکتیو، الکتروموتورهای با بازده مصرفی بالا و... بخشی از فناوری‌هایی است که در بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی در طی چند سال اخیر ورود داشته و تجربیات موفقی از به‌کارگیری این نوع فناوری‌ها در داخل و خارج از کشور ارائه شده است (یوسف گمرکچی، ۱۴۰۳). در جدول (۲) یک جمع‌بندی کلی با محوریت مقایسه فناوری‌های مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی از لحاظ هزینه و درصد کاهش مصرف انرژی ارائه شده است. نکته حائز اهمیت آن است که اعداد اشاره شده در جدول مذکور اطلاعاتی کلی از شاخص میزان صرفه‌جوئی در مصرف انرژی ارائه نموده و به‌منظور تعیین دقیق میزان پتانسیل صرفه‌جوئی در هر ایستگاه پمپاژ، لازم است اطلاعات میدانی دقیق مرتبط با وضعیت بهره‌برداری سامانه ثبت و اندازه‌گیری شده و بر اساس شاخص بازده انرژی مصرفی نسبت به برآورد دقیق پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی (در صورت به‌کارگیری هریک از روش‌های مدیریت مصرف انرژی) می‌توان اظهارنظر نمود.

جدول ۲. مقایسه فناوری‌های مدیریت مصرف انرژی از لحاظ هزینه و درصد کاهش مصرف

ردیف	روش مدیریت مصرف انرژی	میزان اثربخشی فنی و یا اقتصادی	منبع
۱	اعمال ممیزی انرژی	۱۵ تا ۲۰ درصد پتانسیل افزایش بازده انرژی	گریش و شانتانو[1] (۱۹۹۶)
۲	کارکرد پمپ در نزدیک نقطه کارکرد بهینه	تا ۳۵ درصد در کاهش مصرف انرژی و تا ۱۶ درصد کاهش واقعی هزینه	امیری مبارکه (۱۳۹۶)
۳	کارکرد موتور در ولتاژ استاندارد	اگر ولتاژ موتور بیش از ۵ درصد کاهش پیدا کند، راندمان بین ۲ تا ۴ درصد افت خواهد داشت	یوسف گمرکچی (۱۳۹۶)
۴	پیاده‌سازی سامانه‌های اتوماسیون در ایستگاه پمپاژ	۳۲ درصد کاهش مصرف انرژی در صورت استفاده از سیستم های اتوماسیون بجای روش‌های معمول راه‌اندازی	رحیمی و نادری (۱۳۸۹)
۵	به‌کارگیری پمپ دور متغیر	۱۹ درصد افزایش راندمان ایستگاه پمپاژ ۱۸ درصد کاهش مصرف انرژی در حالت کنترل دور متغیر، نسبت به حالت دور ثابت هزینه اولیه استفاده از سیستم کنترل دور متغیر به‌طور متوسط ۸ تا ۹ سال پس از بهره‌برداری سامانه مستهلک خواهد شد (۱۵۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ ساعت کارکرد پمپ)	سلماسی (۱۴۰۱) یوسف گمرکچی و پرورش ریزی (۱۳۹۶) یوسف گمرکچی و پرورش ریزی (۱۳۹۵)

بحث

در دهه‌های اخیر رویکرد به تحلیل مصارف انرژی و بررسی راهکارهای کاهش مصرف انرژی در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، به دلیل سود اقتصادی حاصل از صرفه‌جوئی انرژی در نقاط مختلف دنیا به‌شدت موردتوجه بوده است. اما بررسی سیاست‌ها و دستورالعمل‌های موجود در سطح کشور نشان‌دهنده آن است که توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در طی سه دهه اخیر عمدتاً بر مبنای بهبود کارایی مصرف آب متمرکز بوده و مباحث بهره‌وری انرژی کمتر موردتوجه قرار گرفته است. این در حالی است که طی سال‌های آتی به نظر می‌رسد کسری انرژی یک مؤلفه مهم در توسعه و یا عدم توسعه سامانه‌های آبیاری باشد؛ لذا درک میزان بهره‌وری آب و انرژی در تولیدات زراعی و باغی هر منطقه، اولین گام در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت برای افزایش استفاده از این منابع محسوب می‌شود. همچنین ارائه و به‌کارگیری روش‌های مدیریت مصرف انرژی در بخش کشاورزی یکی از ارکان برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی محسوب خواهد شد.

نتیجه‌گیری

به دلیل گستردگی عوامل دخیل در مدیریت سامانه‌های آبیاری، لازم است فناوری‌های آبیاری متعددی به‌طور مداوم ایجاد شده و کشاورزان با گزینه‌های متفاوتی در مبحث صرفه‌جویی انرژی مواجه شوند تا بر اساس شرایط موجود مزرعه، دست به گزینش روش مناسب و اقتصادی در کنترل مصارف انرژی بزنند به‌رغم وجود فناوری‌های متعدد و متفاوت، بین ایجاد مداوم چنین فناوری‌هایی و ایجاد خطوط راهنمای استاندارد و نظام‌دار برای گزینش مناسب‌ترین فناوری، یک فاصله زمانی وجود دارد. این مسئله خود می‌تواند سبب پذیرش فناوری‌های نامناسب و در نتیجه ناکامی استفاده از فناوری‌های جدید در سامانه‌های آبیاری شود. با رشد فناوری و به‌کارگیری روش‌های جدید در مدیریت ایستگاه پمپاژ این امکان وجود دارد که نه‌تنها در مصرف انرژی صرفه‌جوئی شود بلکه از استهلاک شدید الکتروپمپ‌ها نیز جلوگیری به عمل آید و ضمن عملکرد بهتر ایستگاه‌های پمپاژ، طول عمر آنها نیز افزایش یابد.

1. Girish and Shantanu

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

از ریاست محترم مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی استان قزوین به‌خاطر پشتیبانی جهت مستندسازی پروژه‌های ارائه شده در مقاله حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

امیری مبارکه، محمود. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ از طریق نصب تجهیزات کنترل فشار. *اولین همایش ملی مدیریت مصرف و هدر رفت آب*، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/879324

ثباتی نژاد، احمدرضا، و رضوی، سید حمید. (۱۳۹۴). بهینه‌سازی انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب. دومین کنفرانس ملی مهندسی برق و کامپیوتر سیستم‌های توزیع شده و شبکه های هوشمند،کاشان، ایران. https://civilica. om/doc/511288

دلفان آذری، مرتضی، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۴). کاربرد پمپ‌های دور متغیر در طراحی و بهره‌برداری سامانه‌های تقاضامدار آبیاری. نشریه آب و خاک. ۴۶(۱)، ۴۸-۴۱. https://doi. rg/ 10.22059/ijswr.2015.54294

رحیمی، امین، و نادری، زینب. (۱۳۸۹). بررسی و مقایسه میزان بهینه‌سازی مصرف انرژی در کنترل ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از سیستم اتوماسیون و روش‌های کلاسیک راه‌اندازی (مطالعه موردی ایستگاه پمپاژ تامین آب و ایستگاه‌های پمپاژ تقویت فشار شبکه آبیاری تحت فشار اراضی شرق گرگر). *سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی*، اهواز، ایران. https://civilica.com/doc/112199

رضوانی، سید معین‌الدین، جعفری، علی محمد، و امین، سیف الله. (۱۳۸۹). بررسی بازده و مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آبیاری بارانی برخی مزارع استان همدان. نشریه تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، ۱۱(۴)، ۱۹-۳۴. https://idser. reeo.ac.ir/article_102312.html

رئیسیان امیری، زینب، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۳). طرح و ارزیابی هیدرولیکی پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار (مطالعه موردی: سامانه آبیاری دشت هارکله- لالی). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک،۲۱ (۳)، ۱۶۵-۱۴۵. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1393.21.3.7.6

سلماسی، آرین. (۱۴۰۱). ارزیابی پمپ‌های دور متغیر در سامانه‌های تحت فشار. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۴ (۵)، ۱۷۸۸-۱۷۷۳. https://doi. rg/10.22060/ceej.2021.19867.7277

فتاحی، حمید، شیرزادی، سلیمان، و امین زاده، سعید. (۱۳۹۳). جبران‌سازی توان راکتیو: روش‌ها اهداف و چالش‌ها. *اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران*، گرگان، ایران. https://civilica.com/doc/325606

فتحی مقدم، منوچهر، لشکرآرا، بابک، و بهنیا، عبدالکریم. (۱۳۸۷). بهینه‌سازی انرژی مصرفی برای پمپاژ آب درتلمبه خانه های غیرمکانیزه. *دومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی*، اهواز، ایران. https://civilica.com/doc/60370

فرخی، ملئده، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۴۰۲). ممیزی انرژی در سامانه‌های آبیاری بارانی، روش‌شناسی و کاربرد. مجله پژوهش‌های مهندسی آب ایران، ۲(۲)، ۹۱-۷۹. https://doi. rg/10.22034/ijwer.2023.390180.1034

گمارپور، کریم. (۱۳۸۲). بررسی راندمان الکتروپمپ‌های زارعین محلی خوزستان و شرکت‌های کشت و صنعت. پایان نامه کارشناسی ارشد. گروه آبیاری، *دانشگاه شهید چمران*، اهواز، ایران.

ویسی، فرزاد، و شمشادی، مهرداد. (۱۳۸۷). مدیریت مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی. مجله آب و فاضلاب. ۱۹(۳)،۶۵ -۵۸. https://wwjournal. r/article_2189

یوسف گمرکچی، افشین. (۱۳۹۶). توسعه مدل بهره‌برداری پویا از ایستگاه پمپاژ با پمپ دور متغیر در آبیاری تحت‌فشار. رساله دکتری، *پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران*، تهران، ایران.

یوسف گمرکچی، افشین. (۱۴۰۳). برخی نکات فنی در بهره برداری و راه اندازی ایستگاه‌های پمپاژ آب کشاورزی. *نشریه فنی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور*، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. کرج، ایران. https://press.areeo.ac.ir/book_2863.html

یوســـف گمرکچی، افشـــین.، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۷). تحلیل مصـــارف انرژی در روش‌های مختلف بهره‌برداری از ایسـتگاه‌های پمپاژ آب کشـاورزی (مطالعه موردی: سـامانه آبیاری کشـت و صـنعت اشـرفیه). مجله علوم آب و خاک.۲۲(۲)، ۱۴۳-۱۵۷. http://jstnar. ut.ac.ir/article-1-3305-fa html

یوسـف گمرکچی، افشـین.، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۵). تحلیل هزینه - فایده پمپ‌های دور متغیر در سـامانه‌های آبیاری تحت‌فشـار (مطالعه موردی: سـامانه‌ی آبیاری کشـت و صـنعت اشـرفیه). نشـریه آبیاری و زهکشـی ایران، ۴(۱۰)، ۵۴۳-۵۳۲. https://idj. aid.ir/article_55407.html

یوسـف گمرکچی، افشـین.، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۶). مدل‌سـازی دینامیک پمپ‌های دور متغیر در سـامانه‌های آبیاری تحت فشـار با رویکرد به تحلیل مصـرف انرژی (مطالعهٔ موردی: سـامانهٔ آبیاری کشـت و صـنعت اشـرفیه). *مجله تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی*، ۱۸(۶۸)، ۱۶۰-۱۴۳. https://doi.org/10.22092/aridse.2017.107049.1117

یوسـف گمرکچی، افشـین.، و پرورش ریزی، عاطفه. (۱۳۹۷). نگرشـی بر مفهوم بازده انرژی در ایسـتگاه‌های پمپاژ آب کشـاورزی. مجله آب و توسعه پایدار، ۵ (۱)، ۳۶-۲۹. https://doi. rg/10.22067/jwsd.v5i1.62786

References

Abadia, R., Rocamora, M. C., Corcoles, J. I., Ruiz-Canales, A., Martinez-Romero, A., & Moreno, M. A. (2010). Comparative analysis of energy efficiency in water user's associations. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S2), 134-142. https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1356

Amiri Mobarakeh, M. (2017). Optimizing energy consumption and performance of pumping stations through the installation of pressure control equipment. *First National Conference on Water Consumption and Waste Management*, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/879324 (In Persian)

Belaud, G., Mateos, L., Aliod, R., Buisson, M., Faci, E., Gendre, S., Ghinassi, G., Gonzales Perea, R., Lejars, C., Maruejols, F., & Zapata, N. (2020). Irrigation and energy: Issues and challenges.*Irrigation and Drainage*, 69(S1), 177–185. https://doi.org/10.1002/ird.2343

Boman, B., Smith, S., & Tullos, B. (2006). Control and Automation in Citrus Microirrigation Systems. *Florida Cooperative Extension Service Publications*, Gainesville, Florida. https://edis.ifas.ufl.edu/ch194

Chávez, J. L., Reich, D., Loftis, J. C., & Miles, D. L. (2010). Irrigation pumping plant efficiency. *Colorado State University Cooperative*, Extension, 4, 712. https://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/irrigation-pumping-plant-efficiency-4-712/

Corcoles, J. I., Tarjuelo, J. M., & Moreno, M. A. (2016). Pumping station regulation in on-demand irrigation networks using strategic control nodes. *Agricultural Water Management*, 163, 48–56. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.001

Corominas, J. (2010). Agua y energia en el riego en la época de la sostenibilidad. *Ingenieria del Agua*, 17(3), 219–233.https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977

Delfan Azari, M., & Parvaresh Rizi, A. (2015). Application of Variable- Speed Pumps in Design and Operation of on- Demand Irrigation Systems. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 46(1), 41-48. https://doi.org/10.22059/ijswr.2015.54294 (In Persian)

Diaz, J. A. (2013). The Importance of Improving Energy Efficiency in Irrigated Areas. *Irrigat Drainage Sys Eng,* 2, e117. https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000e117

Diaz, R. J. A., Luque, R. L., Cobo, C. M. T., Montesinos. P., & Poyato. E. C. (2009). Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurized Irrigation networks. *Biosystems engineering*, 104(9), 552-561. https://doi.org/ 10.1016/j.biosystemseng.2009.09.001

Diaz. J. A., Pérez-Urrestarazu, L., Camacho-Poyato, E., & Montesinos, P. (2011). The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. *Spanish Journal of Agricultural Research,* 9(4), 1000-1008. https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-492-10

Farrokhi, M., & Parvaresh Rizi, A. (2022). Energy Audit in Sprinkler Irrigation Systems: Methodology and Application. *Journal Of Iranian Water Engineering Research*, 2(2), 79-91. https://doi.org/10.22034/ijwer.2023.390180.1034_(In Persian)

Fathi Moghadam, M., Lashkara, B., & Behnia, A. (2008). Optimization of energy consumption for pumping water in non-mechanized pump. *Second National Conference on Irrigation and Drainage Network Management*, Ahvaz. Iran. https://civilica.com/doc/60370(In Persian)

Fattahi, H., Shirzadi, S., & Aminzadeh, S. (2014). Reactive Power Compensation: Methods, Goals and Challenges, *First National Conference on Development-Oriented Civil, Architectural, Electrical and Mechanical Engineering of Iran*, Gorgan, Iran. https://civilica.com/doc/325606 (In Persian)

Fernández García, I., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., & Díaz, J. A. (2014). Methodology for Detecting Critical Points in Pressurized Irrigation Networks with Multiple Water Supply Points. *Water Resource Management*, 28,1095–1109. https://doi.org/10.1007/s11269-014-0538-x

Fippes, G., & Neal, B. (1995). Irrigation pumping plant efficiency testing program. *Department of Agricultural Engineering, Texas Agricultural Extension Service*, College Station, Baton Rouge, Louisiana. https://gfipps.tamu.edu/publications/

Girish, S., & Shantanu, D. (1996). Agricultural pumping efficiency in India: the role of standards. *Energy for Sustainable Development*, 3(1), 1-17. https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60178-7

Gomarpour, K. (2003). Investigating the efficiency of electro pumps of local farmers in Khuzestan and agricultural and industrial companies. Master's thesis. *Irrigation Department, Shahid Chamran University*, Ahvaz, Iran.

Jackson, T. M., Khan, S., & Hafeez, M. (2010). A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level. *Agric Water Manage*, 97, 1477–1485. http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.013

Khadra, R., Moreno, M. A., Awada, H., & Lamaddalena, N. (2016). Energy and Hydraulic Performance-Based Management of Large-Scale Pressurized Irrigation Systems. *Water Resour Manage*, 30(10), 3493- 3506. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1365-z

Mora, M., Vera, J., Rocamora, C., & Abadia, R. (2013). Energy Efficiency and Maintenance Costs of Pumping Systems for Groundwater Extraction. *Water Resources Management*, 27(12), 4395-4408. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0423-z

Raeisian Amiri, Z., & Parvaresh Rizi, A. (2014). Hydraulic Design and Evaluation of Variable Speed Pumps on Pressurized Irrigation Systems (Case study: Harkalleh-Laali Irrigation System). *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(3), 145-164. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23222069.1393.21.3.7.6(In Persian)

Rahimi, A., & Naderi, Z. (2010). Investigating and comparing the degree of energy consumption optimization in the control of pumping stations using automation systems and classical startup methods (case study of water supply pumping stations and pumping stations for boosting the pressure of the irrigation network under pressure in the eastern lands of Gargar). *The Third National Conference on Irrigation and Drainage Network Management*, Ahvaz, Iran. https://civilica.com/doc/112199 (In Persian)

Rezvani, S., Jafari, A., & Amin, S. (2011). Efficiency and Energy Consumption in Sprinkler Irrigation Pumping Plants in Some Fields in Hamadan Province. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 11(4),19-34. https://idser.areeo.ac.ir/article_102312.html (In Persian)

Sabatinejad, A. R., & Razavi, S. H. (2015). Energy Optimization in Water Pumping Stations. *Second National Conference on Electrical and Computer Engineering, Distributed Systems and Smart Grids*, Kashan, Iran. https://civilica.com/doc/511288 (In Persian)

Salmasi, A. (2022). Evaluation of variable speed pumps in pressurized water distribution systems. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(5), 1773-1788. https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19867.7277 (In Persian)

Uossef Gomrokchi, A. (2017). Development of a dynamic operation model of a pumping station with a variable speed pump in pressurized irrigation. PhD thesis, *College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran*, Tehran, Iran.

Uossef Gomrokchi, A. (2024). Some technical points in the operation and commissioning of agricultural water pumping stations. *Technical publication of the Soil and Water Research Institute*, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran. https://press.areeo.ac.ir/book_2863.html(In Persian)

Uossef Gomrokchi, A., & Parvaresh Rizi, A. (2016). Investigation of Energy Consumption in Agriculture Water Pumping Stations by Different Operation Methods (Case Study:

Ashrafiyeh Agro-Industry Irrigation System). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(4), 532-543. https://idj.iaid.ir/article_55407.html (In Persian)

Uossef Gomrokchi, A., & parvaresh Rizi, A. (2017). Dynamic Modeling of Variable Speed Pumps in Pressurized Irrigation System Considering Energy Consumption Analysis (Case Study: Ashrafieh Agro-Industry Irrigation System). *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 143-160. https://doi.org/10.22092/aridse.2017.107049.1117 (In Persian)

Uossef Gomrokchi, A., & Parvaresh Rizi, A. (2018). Introduction to the Concept of Energy Efficiency in Agricultural Water Pumping Stations. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(1), 29-36. https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i1.62786(In Persian)

Uossef Gomrokchi, A., & Parvaresh Rizi, A. (2018). Investigation of Energy Consumption in Agriculture Water Pumping Stations by Different Operation Methods (A Case Study: Ashrafiyeh Agro-Industry Irrigation System). *Jwss*, 22 (2),143-157. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3305-fa.html (In Persian)

Veysi, F., & Shemshadie, M. (2008). Energy Consumption Management in Pumping Stations Using Dynamic Modeling. *Journal of Water and Wastewater*, 19(3), 58-65. https://wwjournal.ir/article_2189 (In Persian)

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir Online ISSN:2783-4964

Solving the pollution equations by using the Chebyshev super-spectral viscosity method

Ladan Roshanaei [1], and **Elham Darvishi** [2]✉

1. Department of Water Science and engineering,Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. Iran. E-mail: l.roshanayi@razi.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water Science and engineering,Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. Iran. E-mail: e.darvishi@razi.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 06 April 2025
Received in revised form 29 June 2025
Accepted 31 July 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
pollution,
Advection-Diffusion-Reaction,
spectral Method,
super-spectral viscosity.

ABSTRACT

Objective: The objective of this research is to solve the pollution equation using the Chebyshev spectral method and the Chebyshev super-spectral viscosity method.

Method: Spectral and quasi-spectral methods that have been developed in recent years are able to calculate the solution with higher accuracy than analytical and numerical methods using fewer nodes and less time. These methods have not been investigated for solving pollution equations so far. In this study, the solution of pollution equations using the Chebyshev spectral method and the Chebyshev super spectral viscosity method is investigated. The results of these methods will be compared with the analytical solution under different boundary conditions.

Results: In this study, the accuracy of the Chebyshev spectral method and the Chebyshev super spectral viscosity method for solving pollution equations in two modes of continuous and stepwise pollutant injection was investigated in comparison with the analytical solution. The results of these two methods in solving the advection equation showed that with increasing the number of points, the numerical results are closer to the analytical solution, and with the same number of points, the Chebyshev super spectral viscosity method has a higher accuracy in calculating the pollution concentration. However, none of the graphs match the analytical results. The mentioned methods were used to solve the advection-diffusion and advection-diffusion-reaction equations in stepwise injection and were compared with the analytical results. The Chebyshev super spectral method with the same number of points has a higher accuracy than the Chebyshev spectral method in solving the advection-diffusion equation. The results of this method are completely consistent with the analytical results. Also, both methods have the same results for solving the advection-diffusion-reaction equation, which have a high accuracy compared to the analytical solution.

Conclusions: the results of this study showed that the Chebyshev spectral methods with high accuracy in solving the pollution equations, the number of points required for them is independent of the length of the river. Thus, at a short length, the number of points required is required in a channel or river with a large length.

Cite this article: Roshanaei, L., & Darvishi, E. (2025). Solving the pollution equation by using the Chebyshev super-spectral viscosity method. (2025). *Advanced Technologies in Water Efficiency, 5* (3), 75-91. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12133.1167

© The Author(s)
https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12133.1167 Publisher: Razi University.

Introduction

Today, the issue of pollution transfer in rivers is considered one of the greatest environmental challenges and it has profound effects on aquatic ecosystems and public health. The main causes of water pollution include pollutants, which include two categories of point and non-point sources. Point source pollutant injection comes in two forms: instantaneous (momentary) and continuous. The governing equation of flow in the conditions of pollution conditions of the Second order linear non-homogeneous partial differential equation is that different analytical and numerical methods have been used to solve it. Some of these methods include the; Laplace transform (Kumar›2020), finite volume (Kumar et al, 2021; & Chen et al. 2019), finite difference (Noye, 1987), finite element (Jamali, 2019). These methods require a large number of computational nodes to achieve the desired accuracy. Spectral and quasi spectral methods which are developing in recent years are able to calculate the solution with higher accuracy than analytical and numerical methods. In this research, solving the pollution equations using Chebyshev spectral method and Chebyshev spectral method is studied. The results of this study will be compared with analytical solution in different boundary conditions.

Method

Pollution simulation was conducted for two scenarios: continuous injection (Eq. 1) and stepwise injection. The stepwise injection included two cases. In the first case, the initial concentration $\bar{c}_1$ is uniform across all points (Eq. 2), and the upstream boundary pollution input $\bar{c}_0$=0 is terminated (Eq. 3). In the second case, at time t=0, the pollution input $\bar{c}_0$ at the upstream boundary is terminated, and at time t_1, pollution with concentration $\bar{c}_1$ is introduced at the upstream boundary, which is then terminated at time t_2 (Table 1).

$$\begin{aligned} &\text{B.C.}\ \bar{c}(0,t)=\bar{c}_0\ 0\le t<\infty \\ &\text{I.C.}\ \bar{c}(\bar{x},t)=0\ 0\le \bar{x}<\infty \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{I.C.}: \bar{c}(x,0)=\bar{c}_1 \tag{2}$$

$$\text{B.C. (Upstream)}: \begin{cases} \bar{c}_0\ 0<t\le t_0 \\ \&\ 0\ t>t_0 \end{cases} \tag{3}$$

Table 1. Flow and pollutant characteristics with a time-stepped pattern (Meshdgarmeh et al., 2013)

u(m/s)	$\bar{D}_x$ (m²/s)	$\bar{k}$(1/s)	t_1 (s)	t_2 (s)	T(hr)	$\bar{c}_1$ (kg/m³)	$\bar{c}_0$ (kg/m³)
0.3	0.3	0.00001	1000	3600	5	0.5	0.5

Results

The results obtained from the advection - diffusion - reaction equation for the first case of step injection using spectral and super spectral Chebyshev methods compared to the analytical solution of Van Genuchten et al (1982) indicate that over time, the maximum pollution decreases due to the presence of the reaction term. In this case of pollutant injection, both numerical methods have the same accuracy in predicting the amount of pollution (Figures 1 and 2).

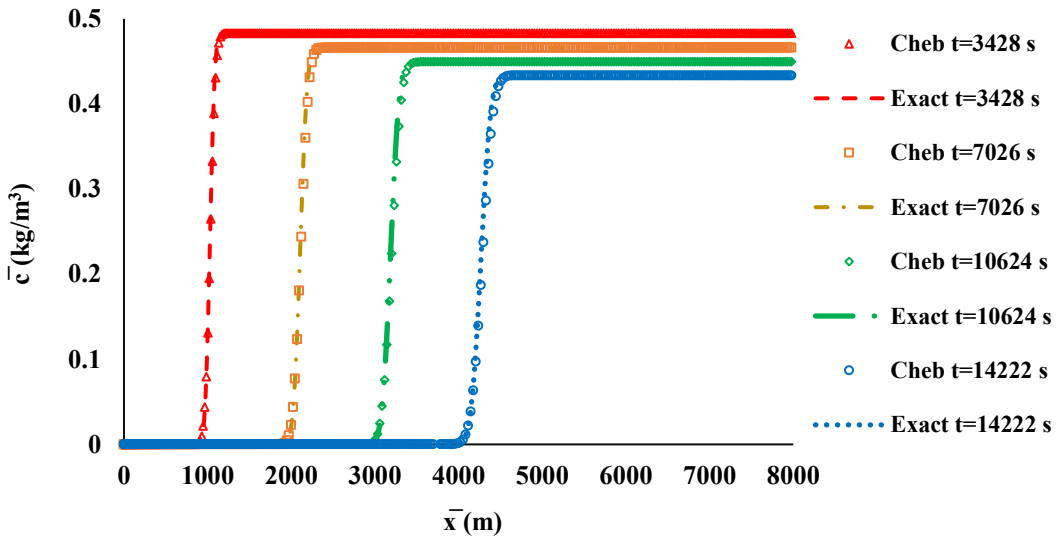


Figure 1. Comparison of the spectral Chebyshev method with the solution of Van Genuchten and Alves (1982) for step injection (Case 1).

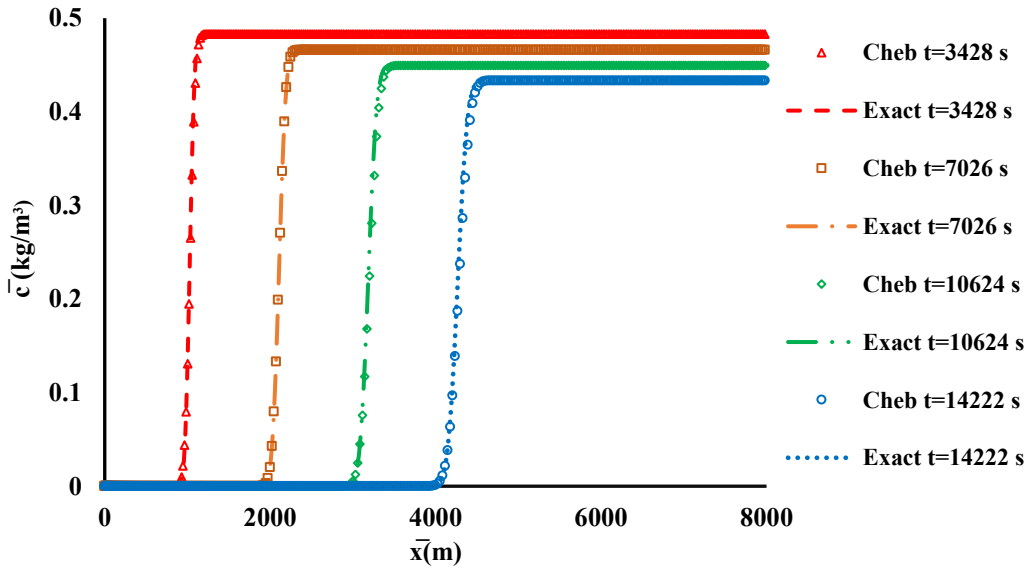


Figure 2. Comparison of the super spectral Chebyshev method with the solution of Van Genuchten and Alves (1982) for step injection (Case 1).

The results obtained from solving the advection - diffusion - reaction equation for the second case of step injection using the spectral and super-spectral Chebyshev methods, compared to the analytical solution at different times, show that both spectral methods have the same accuracy in calculating the concentration of pollutants. Therefore, it can be concluded that the spectral and super-spectral Chebyshev methods have equal precision in solving the advection-diffusion - reaction equation (Figures 3 & 4); however, the execution speed of the spectral Chebyshev method is greater than that of the super-spectral Chebyshev method.

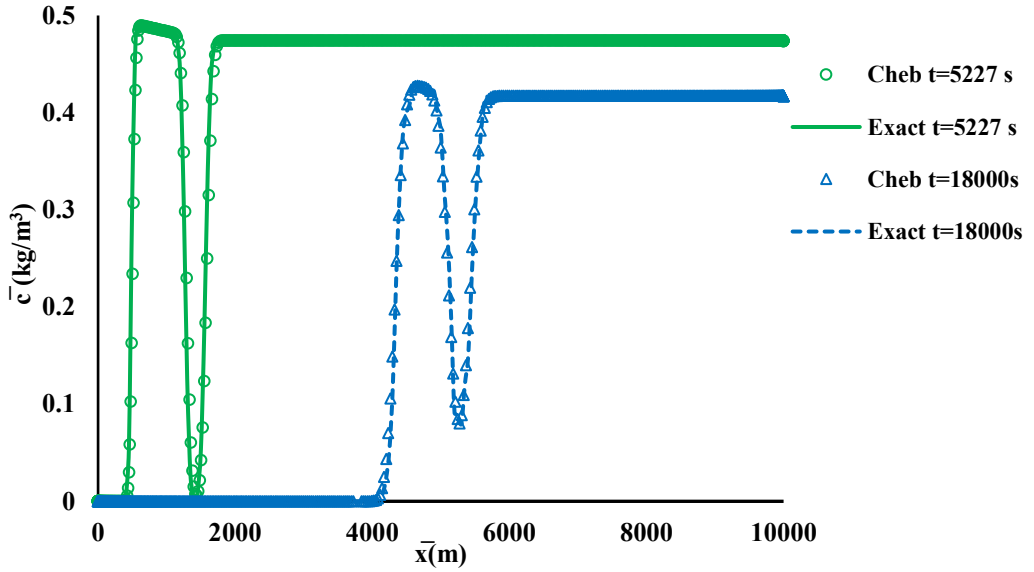


Figure 3. Comparison of the spectral Chebyshev method with the solution of Van Genuchten and Alves (1982) for step injection (Case 2).

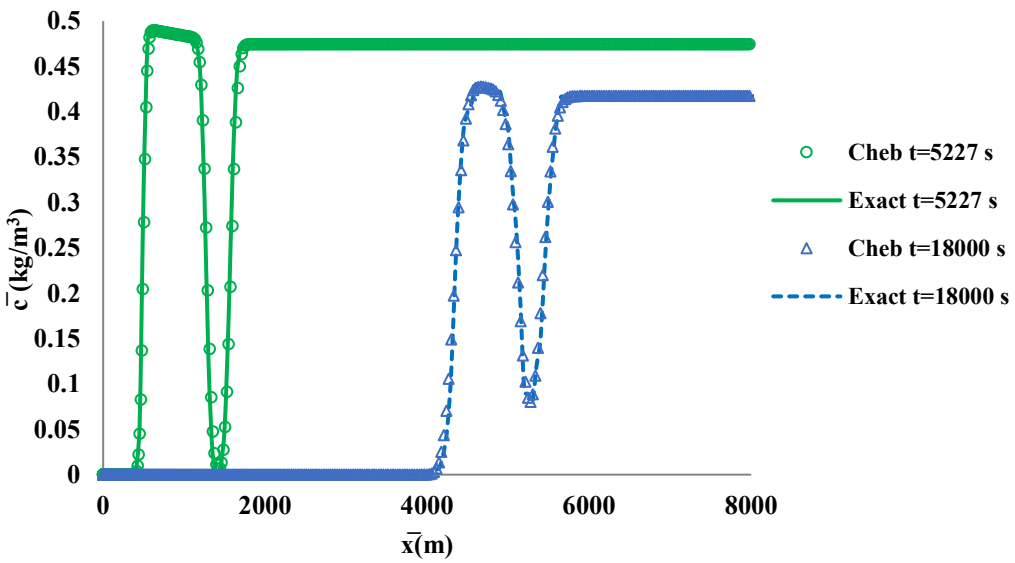


Figure 4. Comparison of the super spectral Chebyshev method with the solution of Van Genuchten and Alves (1982) for step injection (Case 2).

Conclusions

In this research, the accuracy of the Chebyshev spectral method and the Chebyshev super viscosity method was examined for solving pollution equations in two scenarios: continuous and stepwise pollutant injection, compared to analytical solutions. The results of these two methods in solving the advection equation indicated that as the number of points increased, the numerical results approached the analytical solution, and at the same number of points, the

super viscosity Chebyshev method exhibited higher accuracy in calculating pollutant concentration. However, none of the graphs fully aligned with the analytical results.

The mentioned methods were employed to solve advection -diffusion and advection -diffusion-reaction equations under stepwise injection and were compared with analytical results. The super viscosity Chebyshev method demonstrated higher accuracy than the standard Chebyshev method in solving the advection -diffusion equation at the same number of points. The results from this method were in complete agreement with the analytical results. Additionally, both methods yielded similar results for solving the advection -diffusion-reaction equation, showing high accuracy compared to the analytical solution. However, due to a greater operations computational, the super viscosity Chebyshev method had a lower execution speed than the standard Chebyshev method. The Chebyshev spectral methods with high accuracy in solving the pollution equations, the number of points required for them is independent of the length of the river. Thus, at a short length, the number of points required is required in a channel or river with a large length.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

حل معادلات آلودگی با روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف

لادن روشنائی[۱]، و الهام درویشی[۲]✉

۱. گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی ومنابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.رایانامه: l.roshanayi@razi.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: e.darvishi@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
آلودگی،
انتقال – پخش – واکنش،
روش طیفی،
ویسکوزیته فوق طیفی.

چکیده

هدف: هدف از این پژوهش، حل معادلات آلودگی با استفاده از روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف است.

روش پژوهش: روش‌های طیفی و شبه طیفی که در سال‌های اخیر درحال‌توسعه هستند با استفاده از تعداد گره و زمان کمتر قادر به محاسبه جواب بادقت بالاتر نسبت به روش‌های تحلیلی و عددی هستند. این روش‌ها تاکنون برای حل معادلات آلودگی بررسی نشده است. در این پژوهش، حل معادلات آلودگی با استفاده از روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف موردبررسی قرار می‌گیرد. نتایج این روش‌ها با حل تحلیلی در شرایط مرزی مختلف مقایسه خواهد شد.

یافته‌ها: در این پژوهش دقت روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف برای حل معادلات آلودگی در دو حالت تزریق پیوسته و پله‌ای آلاینده در مقایسه با حل تحلیلی بررسی شد. نتایج این دو روش در حل معادله انتقال نشان داد که با افزایش تعداد نقاط نتایج عددی به حل تحلیلی نزدیک‌تر و در تعداد نقاط یکسان روش فوق طیفی ویسکوزیته چبیشف درستی بالاتری در محاسبه غلظت آلودگی دارد. اما نمودار هیچ یک بر نتایج تحلیلی منطبق نیست. روش‌های ذکر شده برای حل معادلات انتقال – پخش و انتقال – پخش – واکنش در تزریق پله‌ای به کار رفت و با نتایج تحلیلی مقایسه شد. روش فوق طیفی چبیشف با تعداد نقاط یکسان درستی بالاتری را نسبت به روش طیفی چبیشف در حل معادله انتقال – پخش دارد. نتایج این روش بر نتایج تحلیلی کاملاً منطبق هستند. همچنین هر دو روش نتایج یکسانی برای حل معادله انتقال – پخش – واکنش دارند که درستی بالایی در مقایسه با حل تحلیلی دارند. اما روش فوق طیفی چبیشف به دلیل انجام حجم عملیات بیشتر نسبت به روش طیفی چبیشف، سرعت اجرای کمتری دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که روش‌های طیفی چبیشف باوجود دقت بالا در حل معادلات آلودگی، تعداد نقاط لازم برای آنها مستقل از طول رودخانه هستند؛ بنابراین در یک طول کوتاه همان تعداد نقاط لازم است که در یک کانال یا رودخانه با طول زیاد لازم است.

استناد:روشنائی، لادن؛ و درویشی، الهام. (۱۴۰۴). حل معادله آلودگی با روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف . *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۳)، ۹۱-۷۵.

http//doi.org/10.22126/atwe.2025.12133.1167

ناشر: دانشگاه رازی. © نویسندگان

مقدمه

آب، این مایع حیات‌بخش، شریان اصلی تمدن‌ها و بستری برای شکل‌گیری و تداوم حیات در کره زمین است. منابع آبی، به‌ویژه رودخانه‌ها، به‌عنوان مهم‌ترین تأمین‌کنندگان آب شیرین، نقش بی‌بدیلی در توسعه جوامع بشری، رونق کشاورزی و صنعت، و حفظ تعادل اکولوژیکی ایفا می‌کنند(گلیک پیتر[1]، ۲۰۰۳). رودخانه‌ها نه‌تنها منبع اصلی آب شیرین برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت هستند، بلکه زیستگاه‌های مهمی برای تنوع زیستی محسوب می‌شوند و در تنظیم چرخه‌های هیدرولوژیکی و آب‌وهوایی نقش دارند. امروزه مسئله انتقال آلودگی در رودخانه‌ها یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی به شمار می‌آید و تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌های آبی و سلامت عمومی دارد(کیلیک[2]، ۲۰۲۱). از دلایل اصلی آلودگی آب‌ها، می‌توان به آلاینده‌ها اشاره کرد. آلاینده‌ها شامل دو دسته منابع نقطه‌ای و منابع غیر نقطه‌ای هستند. ورود آلاینده‌ها به منابع آبی، چه از طریق منابع نقطه‌ای (مانند خروجی فاضلاب‌های صنعتی و شهری) و چه از طریق منابع غیر نقطه‌ای (مانند رواناب‌های کشاورزی و شهری)، منجر به کاهش کیفیت آب، تخریب زیستگاه‌های آبی و اختلال در چرخه‌های طبیعی می‌شود(کارپنتر و همکاران[3]، ۱۹۹۸). در دهه‌های اخیر، با افزایش جمعیت، توسعه صنعتی و کشاورزی، و تغییرات اقلیمی، بار آلاینده‌ها در منابع آبی به طور چشمگیری افزایش‌یافته و پیامدهای منفی آن به‌وضوح قابل‌مشاهده است؛ لذا، شناسایی منابع آلاینده، ارزیابی اثرات آنها و ارائه راهکارهای مناسب برای کنترل و کاهش آلودگی آب، از اهمیت بسزایی برخوردار است.

تزریق آلاینده‌های نقطه‌ای نیز به دو شکل آنی (لحظه‌ای) و پیوسته است(آژدان، ۱۳۹۷). تزریق آنی (مانند رهاسازی ناگهانی مواد آلاینده در اثر حوادث صنعتی) و تزریق پیوسته (مانند نشت تدریجی آلاینده‌ها از مناطق کشاورزی یا محل‌های دفن زباله). هر دو نوع تزریق، اثرات قابل‌توجهی بر کیفیت آب، سلامت اکوسیستم‌های آبی و بهداشت عمومی دارند(لاپورث[4]، ۲۰۱۲). تزریق آنی اغلب منجر به افزایش سریع غلظت آلاینده‌ها و ایجاد شرایط بحرانی می‌شود. درحالی‌که تزریق پیوسته، به‌مرورزمان باعث تجمع آلاینده‌ها و بروز اثرات بلندمدت می‌گردد. بررسی و مدیریت هر دو نوع تزریق برای حفاظت از منابع آبی ضروری است. حرکت مولکولی آب و همچنین سرعت غیریکنواخت جریان سبب می‌شوند که زمانی‌که آلودگی وارد جریان شد، با آن همراه شود. معادله انتقال – پخش – واکنش[5]، معادله حاکم بر جریان در شرایط آلودگی است که برای شبیه‌سازی جریان و انتشار آلودگی کاربرد دارد. این معادله از نوع معادلات دیفرانسیل سهموی غیرهمگن، خطی و مرتبه دوم[6]است و از ترکیب معادله پیوستگی و قانون اول فیک[7] به‌دست‌آمده و دارای کاربردهای وسیعی در علوم آب و جو، انتقال حرارت و علوم مهندسی است(کاتو و همکاران[8]،۲۰۲۳).

روش‌های طیفی و شبه طیفی که در سال‌های اخیر درحال‌توسعه هستند با استفاده از تعداد گره و زمان کمتر قادر به محاسبه جواب بادقت بالاتر نسبت به روش‌های تحلیلی و عددی هستند. این روش‌ها تاکنون برای حل معادلات آلودگی بررسی نشده است.

1. Gleick Peter
2. Kilic
3. Carpenter et al
4. Lapworth
5. Advection- Diffusion- Reaction Equation
6. Non- homogeneous, linear, second- order partial differential equations
7. Fick 's first law
8. Kato et al

در این پژوهش، حل معادلات آلودگی با استفاده از روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف موردبررسی قرار می‌گیرد. نتایج این روش‌ها با حل تحلیلی در شرایط مرزی مختلف مقایسه خواهد شد.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

روش‌های تحلیلی و عددی مختلفی برای حل معادله حاکم بر پدیده آلودگی به‌کاررفته است. راه‌حل تحلیلی و یا عددی معادله می‌تواند در جهت توضیح نحوه توزیع غلظت ماده آلاینده و رفتار آن در یک محیط باز مانند هوا، رودخانه و محیط متخلخل‌ؤثر واقع شود. دررابطه‌با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت‌گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

فردادی شیل‌سر و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی به بررسی حل تحلیلی معادله انتقال و واکنش در سیستم‌های آبی پرداختند و روش‌های مختلف حل این معادله را تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که حل تحلیلی موجود در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری جهت صحت‌سنجی و اعتبارسنجی حل‌های عددی و سایر حل‌های تحلیلی برای ضرایب متغیر معادله مورداستفاده قرار گیرد.

فتحی و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیق خود به حل عددی معادله انتقال – پخش – واکنش با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته پرداخته و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تأثیر پارامترهای مختلف بر روی نتایج شبیه‌سازی بوده است. این مطالعه اهمیت انتخاب روش مناسب برای حل این معادلات را برجسته کرده است.

۲. مطالعات خارجی

یاداو و همکاران[1] (۲۰۱۰) معادله انتقال و پخش همراه با ترم زوال را به‌صورت تحلیلی حل و تعیین کردند که یک آلودگی مشخص بعد از گذشت چه زمان و مکانی زوال می‌یابد.

کومار[2] (۲۰۲۰) با استفاده از تبدیل لاپلاس، موفق به یافتن راه‌حل‌های تحلیلی برای معادله آلودگی در آب‌های زیرزمینی شدند و نتایج نشان داد که این روش می‌تواند به سادگی شرایط اولیه و مرزی پیچیده را مدیریت کند.

کومار و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود نشان دادند که روش حجم محدود در شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی می‌تواند به‌دقت بالایی برسد و نسبت به روش‌های دیگر، مزایای بیشتری از نظر حفظ تعادل جرم دارد. در تحقیقی دیگر چن و همکاران[3] (۲۰۱۹) به بررسی کاربرد روش حجم محدود در شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی پرداخته و مزایای آن را نسبت به روش‌های قدیمی‌تر بیان کرده‌اند.

محمود و همکاران[4] (۲۰۲۲) به ارائه راه‌حل‌های دقیق برای معادله پخش – واکنش با استفاده از روش‌های خاص ریاضی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که این راه‌حل‌ها می‌توانند برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های بیولوژیکی مفید باشند.

1. Yadav et al
2. Kumar
3. Chen et al
4. Mahmoud et al

نویی[1] (۱۹۸۷) روش‌های عددی مانند روش تفاضل محدود[2] و روش حجم محدود[3] برای حل معادله انتقال – پخش – واکنش را موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش حجم محدود دقت بالاتری نسبت به روش تفاضل محدود در شرایط مرزی پیچیده دارد.

جمالی (۲۰۱۹) مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف عددی برای حل معادله پخش – واکنش انجام داده اند. نتایج نشان داد که روش المان محدود[4] بهترین دقت را در شبیه‌سازی سیستم‌های غیرخطی فراهم می‌کند، اما زمان محاسباتی آن بیشتر از سایر روش‌ها است.

باروس[5](۲۰۱۹) به بررسی رویکردهای ترکیبی برای حل معادله انتقال – پخش – واکنش پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های تحلیلی و عددی می‌تواند دقت بالاتری را ارائه دهد و زمان محاسباتی را کاهش دهد.

روش پژوهش

۱. معادلات ریاضی

روابط حاکم بر پدیده آلودگی در حالت یک‌بعدی شامل معادلات انتقال (معادله (۱))، انتقال – پخش (معادله (۲)) و انتقال – پخش – واکنش (معادله (۳)) هستند (وان جنکتن و همکاران[6]، ۱۹۸۲: چاپرا[7]، ۱۹۹۷).

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}+u\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}+u\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}=\bar{D}_x\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t}+u\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}+\bar{k}\bar{c}=\bar{D}_x\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} \qquad (۳)$$

در این معادلات $\bar{c}$ برحسب میلی‌گرم بر لیتر مقدار غلظت آلاینده در زمان t (ثانیه) و مکان $\bar{x}$ (متر)، u سرعت متوسط جریان برحسب متر بر ثانیه، $\bar{D}_x$ ضریب پخش طولی برحسب مترمربع بر ثانیه و $\bar{k}$ ثابت نرخ واکنش برحسب معکوس ثانیه است

۲. روش ویسکوزیته طیفی چبیشف

در روش طیفی چبیشف بسط سری برای یک تابع $u(x,\tau)$ در دامنه $[-1,1]$ به‌صورت زیر تقریب زده می‌شود (روگر پیرت[8]،۲۰۰۲).

$$U_N=\sum_{k=0}^{N} U_k(\tau)T_k(x) \qquad (۴)$$

1. Noye
2. Finite Difference Method
3. Finite Volume Method
4. Finite Element Method
5. Barros
6. Van Genuchten et al
7. Chapra
8. Roger Peyert

که $U_k(\tau)$ ضرایب طیفی سری وابسته به زمان $T_k(x)$ چندجمله‌ای چبیشف از درجه k است و باتوجه‌به $x \in [-1,1]$ به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T_k = \cos(k\cos^{-1}x)\ U_N = \sum_{k=0}^{N} U_k(\tau)T_k(x) \tag{۵}$$

و x نقاط درون‌یاب که به نقاط چبیشف معروف هستند:

$$x_i = \cos\left(\frac{i\pi}{N}\right)\ ,\ i=0,1,2,\ldots,N \tag{۶}$$

و با استفاده از رابطه معکوس، ضرایب را به‌صورت معادله (۷) می‌توان محاسبه کرد:

$$u_k(\tau) = \frac{2}{Nc_k}\sum_{i=0}^{N}\frac{U(x_i,\tau)_N}{c_i}\cos\left(\frac{ki\pi}{N}\right) \tag{۷}$$

که c_k و ci برای k در بازه $i=0,1,2,\ldots,N-1$ برابر یک و $c_0=c_n=2$ است. مشتق مکانی مرتبه n ام بسط سری تابع $u(x,\tau)$ ، در نقاط x_i با استفاده از مشتق تحلیلی چندجمله‌ای لاگرانژ محاسبه می‌شود و اگر تابع به‌صورت رابطه (۸) نوشته شود، D^n یک ماتریس $(N+1)\times(N+1)$ خواهد بود که $D^{(1)}=D=d_{ik}$ و از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$u^n = D^n u \tag{۸}$$

$$d_{ik} = \begin{cases} \dfrac{c_i(-1)^{(i+k)}}{c_k(x_k-x_i)}\ i\neq k \\ \dfrac{x_i}{2(1-x_i^2)}\ 1\leq i=k\leq N-1 \\ \dfrac{-2N^2+1}{6}\ i=k=0 \\ \dfrac{2N^2+1}{6}\ i=k=N \end{cases} \tag{۹}$$

با استفاده از این ماتریس به‌جای محاسبه ضرایب سری، جملات u در هر مکان محاسبه خواهد شد. در صورت وجود تغییرات ناگهانی در جواب‌های روش طیفی چبیشف، به سمت جواب درست همگرا نخواهد بود. در این حالت عبارت ویسکوزیته طیفی پایداری تقریب و اطمینان از همگرایی آن به سری اضافه شده است (تادمر[1]، ۱۹۸۹). معادله چندجمله‌ای چبیشف با عبارت ویسکوزیته به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$-CN\sum_{k=0}^{N}\left(\frac{k}{N}\right)^{2S} u_k(t)T_k(x) \tag{۱۰}$$

در این معادله C و s دو مقدار در روش ویسکوزیته فوق طیفی هستند (چن و همکاران، ۲۰۱۳). ضریب C باتوجه‌به عبارت $0 \leq C \leq N^{1/2}$ تعیین می‌شود و برای ضریب s باید $s \leq \ln(N)$ باشد. طبق نتایج آنها چنانچه مقدار $\ln(N)$ برای s و $N^{1/2}$ برای C انتخاب شود نتایج خوبی به‌دست خواهد آمد. از آنجایی که جملات سری چبیشف در بازه [-1,1] قرار دارند. لازم

1. Tadmor

اســـت متغیرهای معادلات دیفرانســـیل در این بازه قرار گیرد. به همین دلیل با ضـــرب معادلات (۱)، (۲) و (۳) $\frac{L}{2u\bar{c}_0}$ و تعریف پارامترهای بدون بعد به‌صورت زیر معادلات به‌صورت معادلات (۱۱) تا (۱۳) بازنویسی می‌شوند.

$$x=\frac{2}{L}\bar{x}-1,\tau=\frac{tu}{\frac{L}{2}},\ c=\frac{\bar{c}}{\bar{c}_0},k=\frac{\bar{k}L}{2u},D_x=\frac{\overline{D_x}}{u\frac{L}{2}} \tag{۱۱}$$

$$\frac{\partial c}{\partial \tau}+\frac{\partial c}{\partial x}=0$$

$$\frac{\partial c}{\partial \tau}+\frac{\partial c}{\partial x}=D_x\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{۱۲}$$

$$\frac{\partial c}{\partial \tau}+\frac{\partial c}{\partial x}+kc=D_x\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{۱۳}$$

۳. حالت‌های مختلف شبیه‌سازی آلودگی

الف) تزریق پیوسته

تزریق پیوسته آلودگی به معنای ورود مداوم و مستمر مواد آلاینده به آب رودخانه است. این نوع آلودگی معمولاً ناشی از منابع ثابت و پایدار است که به طور دائم یا به‌صورت دوره‌ای به آب وارد می‌شوند. با فرض ثابت‌بودن سرعت جریان و پایداری پروفیل جریان، جواب تحلیلی معادله (۱)(انتقال) در حالت تزریق پیوسته برمبنای تابع هویساید است (شارما[1]، ۲۰۱۸).

$$\bar{c}(\bar{x},t)=\bar{c}_0\,H(ut-\bar{x}+x_0) \qquad H(ut-\bar{x}+x_0)=\begin{cases}\&1ut\geq\bar{x}-x_0\\ \&0ut<\bar{x}-x_0\end{cases} \tag{۱۴}$$

که در آن H تابع پله‌ای هویساید، $\bar{x}$ طول مسیر، x_0 فاصله از محل تخلیه آلاینده، u سرعت، t زمان و $\bar{c}_0$ غلظت آلودگی در محل تزریق است. همچنین پاسخ معادله (۲) (انتقال- پخش) در حالت تزریق پیوسته، تحت شرایط مرزی[2] (B.C.) و اولیه[3] (I.C.) زیر:

$$B.C.\bar{c}(0,t)=\bar{c}_0 0\leq t<\infty$$
$$I.C.\bar{c}(\bar{x},t)=00\leq\bar{x}<\infty$$

چنین است:

$$\bar{c}(\bar{x},t)=\left[\frac{\bar{c}_0}{2}\exp\left(\frac{u\bar{x}}{E}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{\bar{x}+ut}{\sqrt{4Et}}\right)+\mathrm{erfc}\left(\frac{\bar{x}-ut}{\sqrt{4Et}}\right)\right] \tag{۱۵}$$

و دراین‌رابطه، E ضریب پخش طولی است (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۹).

1. Sharma
2. Boundary Condition
3. Initial Condition

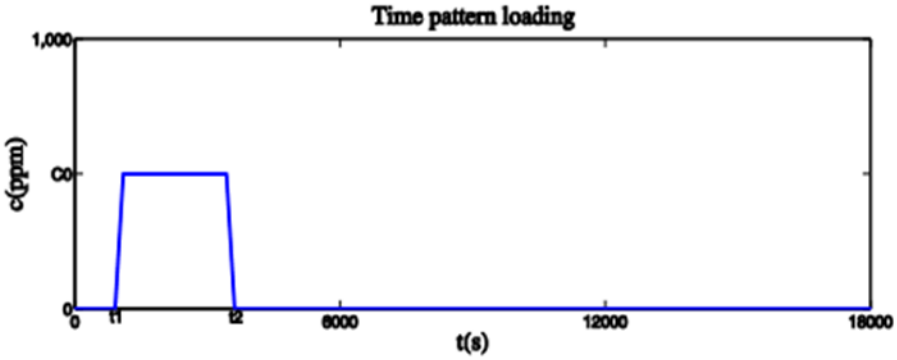
ب) تزریق پله‌ای

تزریق پله‌ای آلودگی به‌صورت مرحله‌ای و در زمان‌های مشخص، با مقادیر کنترل شده و برای یک بازه مشخص زمانی وارد محیط می‌شود. در این مقاله دو حالت تزریق پله‌ای بررسی شده است که توسط مشهدی‌گرمه و همکاران(۱۳۹۲) ارائه شده است. رابطه ۱۶ شرایط اولیه و رابطه ۱۷ و ۱۸ به ترتیب شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست را برای حالت اول و شکل (۱) شرایط مرزی حالت دوم را نشان می‌دهد.

$$I.C.:\ \bar{c}(x,0)=\bar{c}_1 \tag{۱۶}$$

$$B.C.(Upstream):\begin{cases}\bar{c}_0 0<t\le t_0\\ 0t>t_0\end{cases} \tag{۱۷}$$

$$B.C.(Downstream):\ \frac{\partial\bar{c}}{\partial\bar{x}}(\infty,t)=0 \tag{۱۸}$$



شکل ۱. فرم شماتیک الگوی تزریق پله‌ای(مشهدگرمه و همکاران ۱۳۹۲)

راه‌حل تحلیلی وان‌جنکتن (۱۹۸۲) برای معادله (۳) (انتقال – پخش – واکنش) در حالت تزریق پله‌ای به‌صورت رابطه (۱۹) خواهد بود.

$$\bar{c}(\bar{x},t)=\begin{cases}\bar{c}_1A(x,t)+\bar{c}_0B(x,t) & 0<t\le t_0\\ \bar{c}_1A(x,t)+\bar{c}_0B(x,t)-\bar{c}_0B(x,t-t_0) & t>t_0\end{cases} \tag{۱۹}$$

$$A(\bar{x},t)=exp(-\bar{k}t)\left[1-\frac{1}{2}erfc\left(\frac{\bar{x}-ut}{2(\bar{D}_xt)^{\frac{1}{2}}}\right)-\frac{1}{2}exp\left(\frac{u\bar{x}}{\bar{D}_x}\right)erfc\left(\frac{\bar{x}+ut}{2(\bar{D}_xt)^{\frac{1}{2}}}\right)\right] \tag{۲۰}$$

$$B(\bar{x},t)=\frac{1}{2}\exp\left(\frac{(u-V)\bar{x}}{2\bar{D}_x}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{\bar{x}-Vt}{2(\bar{D}_xt)^{\frac{1}{2}}}\right)+\frac{1}{2}\exp\left(\frac{(u+V)\bar{x}}{2\bar{D}_x}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{\bar{x}+Vt}{2(\bar{D}_xt)^{\frac{1}{2}}}\right) \tag{۲۱}$$

$$V=u\left(1+\frac{4\bar{k}\bar{D}}{u^2}\right)^{0.5} \tag{۲۲}$$

یافته‌های پژوهش

به‌منظور ارزیابی روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف، شبیه‌سازی برای دو مثال فرضی یکی در حالت تزریق پیوسته آلاینده و دیگری با درنظرگرفتن الگوی بارگذاری پله‌ای با فرض منبع آلاینده نقطه‌ای انجام و با نتایج حل تحلیلی مقایسه شده است.

۱. نتایج تزریق پیوسته

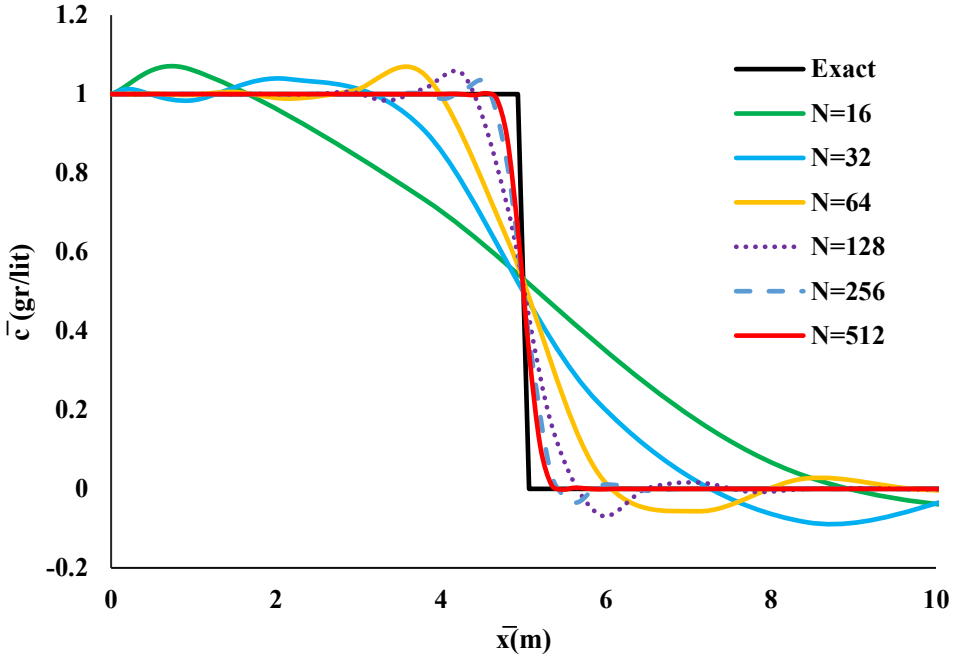
در حال تزریق پیوسته معادلات (۱) و (۲) با استفاده از شرایط اولیه و مرزی جدول (۱) حل و با حل تحلیلی مقایسه خواهد شد. در هنگام تزریق پیوسته معادلات آلودگی به روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف حل شد.

جدول ۱. شرایط اولیه و مرزی در حالت تزریق پیوسته (فتاحی‌چقابگی، ۱۳۹۱)

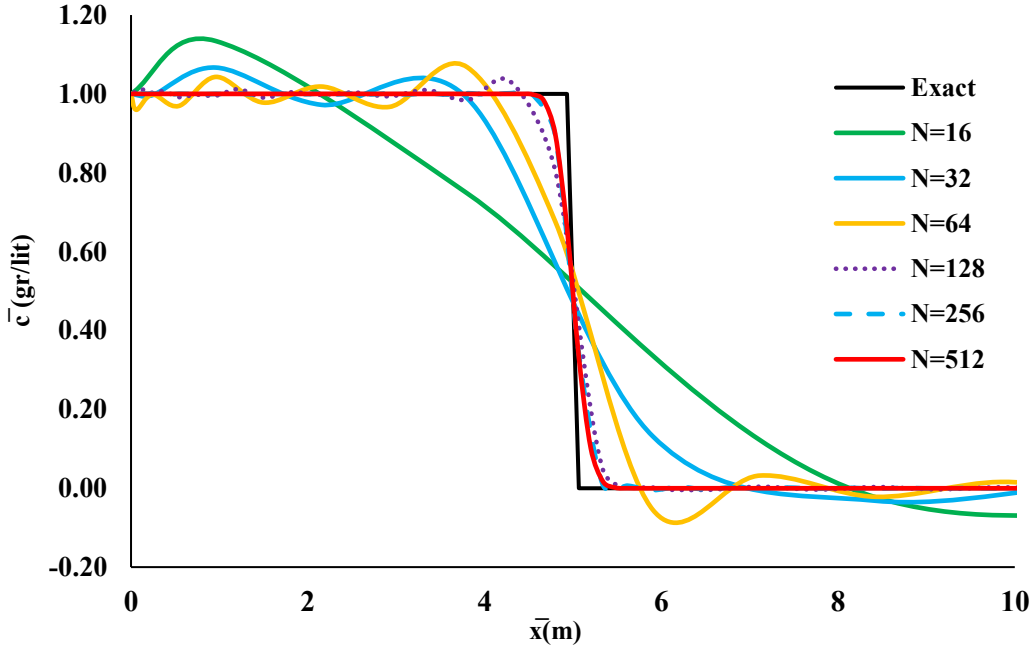
شرط اولیه	$\bar{c}(\infty,0)=0$ gr/lit
شرط مرزی	$\bar{c}(1,t)=1$ gr/lit
سرعت	u=0.1 m/sec
ضریب پخش طولی	$\bar{D}_x=0.01$ m^2/sec

در ابتدا به‌منظور بررسی تأثیر تعداد نقاط، با گام زمانی 10^{-4} ثانیه برای تعداد نقاط ۱۶، ۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۲۵۶ و ۵۱۲ مقادیر آلودگی(معادله(۱)) در حالت تزریق پیوسته با روش طیفی چبیشف و ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف محاسبه و نتایج به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

با افزایش تعداد نقاط، نوسانات نمودار غلظت آلودگی در هر دو روش کاهش می‌یابد و به حل تحلیلی نزدیک می‌شود؛ با افزایش تعداد نقاط سرعت انجام محاسبات کاهش می‌یابد. مقایسه دو روش عددی نشان می‌دهد که در تعداد نقاط یکسان، نمودار روش فوق طیفی ویسکوزیته چبیشف اندازه نوسانات کوچک‌تری نسبت به روش طیفی چبیشف دارد. همچنین در روش فوق طیفی چبیشف نمودار برای تعداد نقاط ۲۵۶ و ۵۱۲ برهم منطبق است. بدین معنی که این روش با تعداد نقاط کمتر نسبت به روش طیفی چبیشف دقت مناسبی دارد. با انتخاب مناسب گام زمانی و تعداد نقاط می‌توان آنها را حذف کرد.

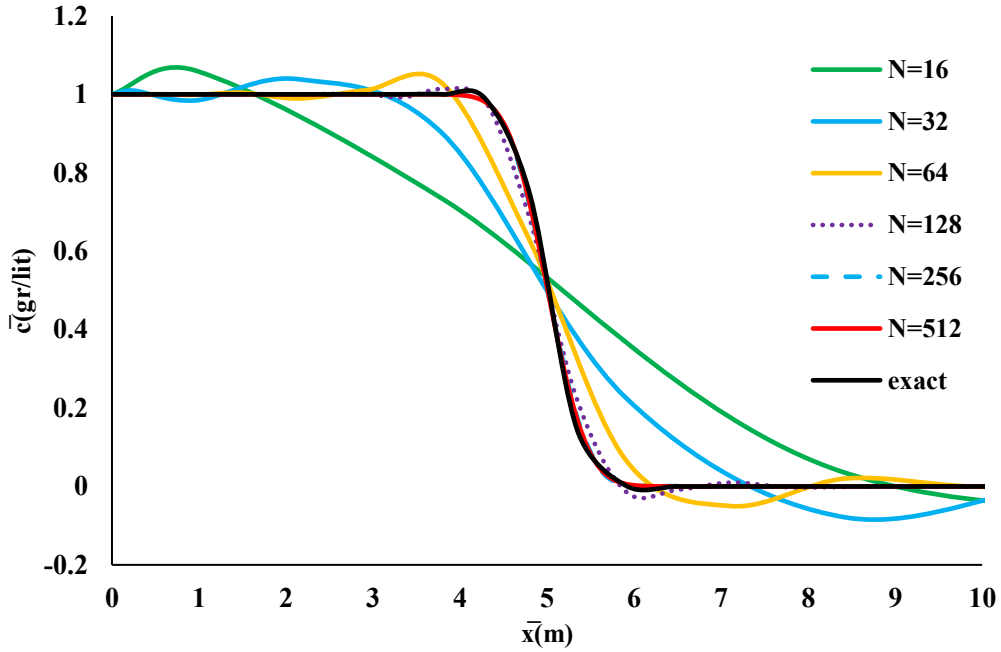


شکل ۲. آلودگی در حالت انتقال و تزریق پیوسته ماده آلاینده (مقایسه حل تحلیلی و روش طیفی چبیشف)

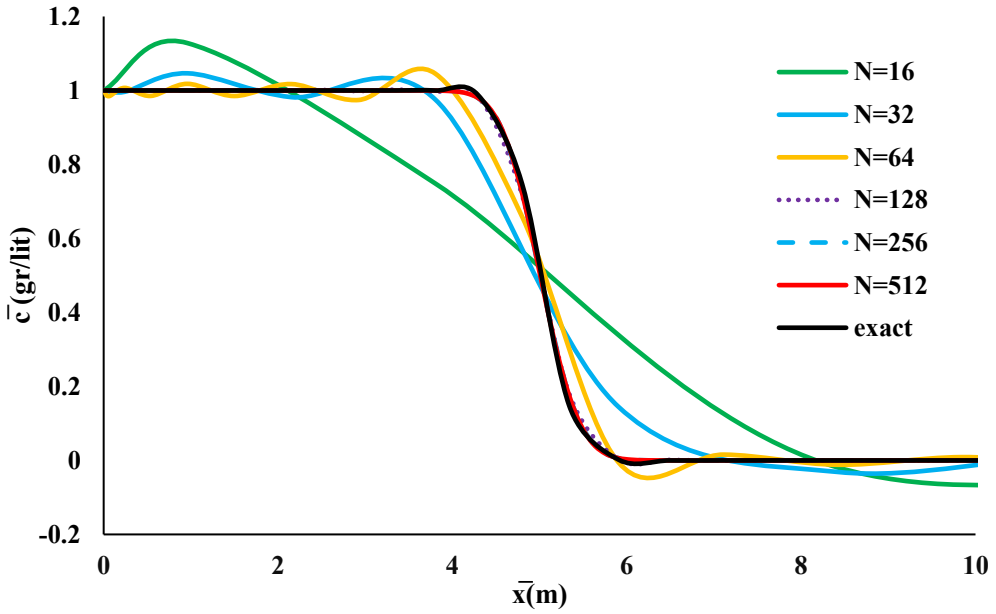


شکل ۳. آلودگی در حالت انتقال و تزریق پیوسته ماده آلاینده (مقایسه حل تحلیلی و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف)

نتایج حل معادله (۲) به هر دو روش عددی در مقایسه با حل تحلیلی، برای داده‌های جدول (۱) در شکل (۴) و (۵) ارائه شده است. روش‌های طیفی و فوق‌طبیعی چبیشف برای حل معادله انتقال- پخش نیاز به تعداد نقاط کمتری دارند و در همه نمودارها نوسانات در مقایسه با نتایج معادله انتقال نوسانات کمتری وجود دارد. در این حالت نتایج روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف برای تعداد نقاط ۱۲۸، ۲۵۶ و ۵۱۲ و نتایج روش طیفی چبیشف برای تعداد نقاط ۲۵۶ و ۵۱۲ بر هم منطبق هستند. همچنین هر دو روش عددی درستی بالاتری در حل معادله انتقال- پخش نسبت به حل معادله انتقال دارند.



شکل ٤. آلودگی در حالت انتقال – پخش و تزریق پیوسته ماده آلاینده (مقایسه حل تحلیلی و روش طیفی چبیشف)



شکل ٥. آلودگی در حالت انتقال– پخش و تزریق پیوسته ماده آلاینده (مقایسه حل تحلیلی و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف)

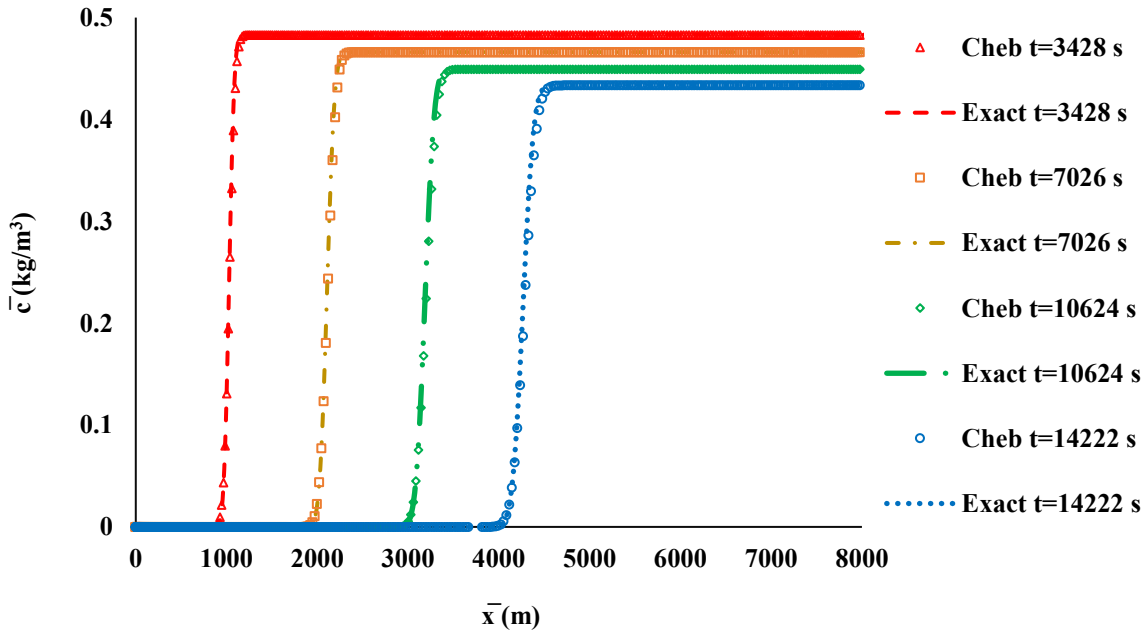
۲. نتایج تزریق پله‌ای

معادله انتقال – پخش – واکنش برای تزریق پله‌ای برای دو حالت به روش‌های ذکر شده حل شد. در این حالت به دلیل اضافه‌شدن برخی ترم‌ها به معادله (۳) ، تعداد نقاط برای انجام محاسبات کمتر شد و به هنگام حل با روش طیفی چبیشف تعداد نقاط ۱۲۸ و با روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف ۶۴ در نظر گرفته شد. شرایط اولیه و مرزی، حالت اول در روابط (۱۶) تا (۱۸) آمده است. مطابق جدول (۲)، در این حالت غلظت اولیه $\bar{c}_1$ در همه نقاط برابر است و در مرز بالادست آلودگی ورودی $\bar{c}_0=0$ قطع می‌شود. در حالت دوم در زمان $t=0$ آلودگی در مرز بالادست قطع و در زمان t_1 آلودگی با غلظت $\bar{c}_0$ در مرز بالادست وارد می‌شود و در زمان t_2 تزریق آلودگی قطع می‌شود که در جدول (۲) نشان داده شده است.

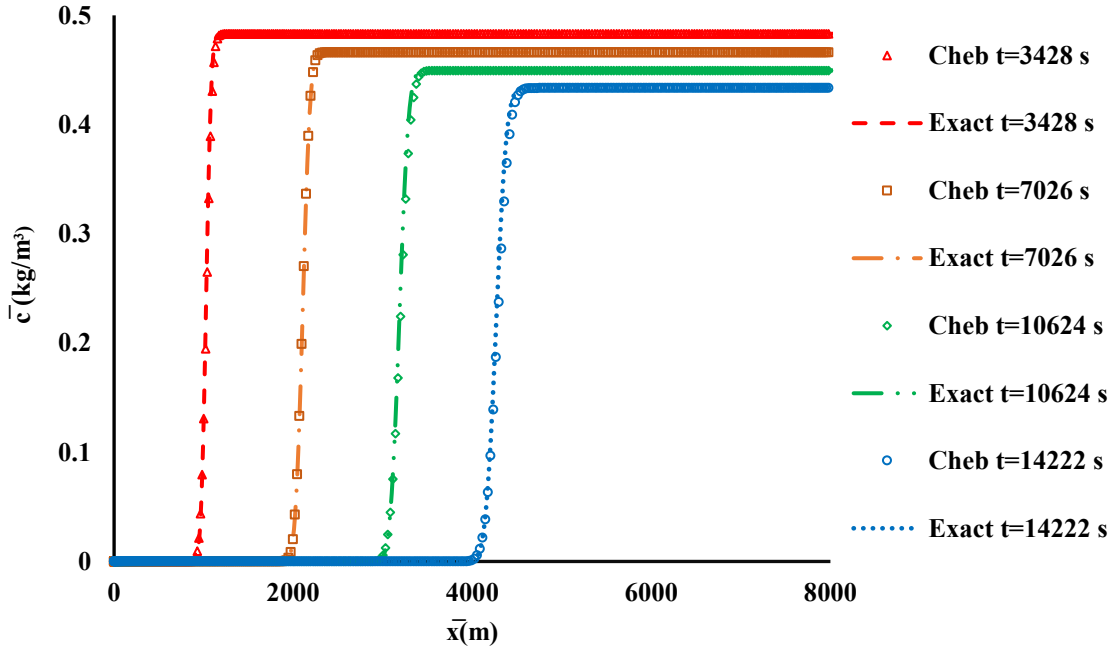
به‌منظور بررسی درستی روش‌های طیفی و فوق طیفی چبیشف در حل معادله انتقال – پخش – واکنش، مقایسه نتایج با حل تحلیلی وان جنکتن و همکاران (۱۹۸۲) رابطه (۱۹) انجام شده است. نتایج حالت اول تزریق پله‌ای در زمان‌های مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب برای روش طیفی و فوق طیفی چبیشف آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان حداکثر آلودگی به دلیل وجود جمله واکنش کاهش‌یافته است. در این حالت تزریق آلودگی هر دو روش عددی درستی یکسانی در پیش‌بینی مقدار آلودگی دارند. نتایج حالت دوم در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب برای روش طیفی و فوق طیفی چبیشف در مقایسه با حل تحلیلی در زمان‌های مختلف ارائه شده است. هر دو روش طیفی دارای درستی یکسان در محاسبه غلظت آلودگی هستند؛ بنابراین می‌توان گفت که روش طیفی و فوق‌طبیعی چبیشف برای حل معادله انتقال – پخش – واکنش دارای دقت یکسان هستند. اما سرعت اجرای روش طیفی چبیشف بیشتر از روش فوق‌طبیعی چبیشف است.

جدول ۲. مشخصات جریان و آلاینده با الگوی زمانی پله‌ای (مشهدگرمه و همکاران ۱۳۹۲)

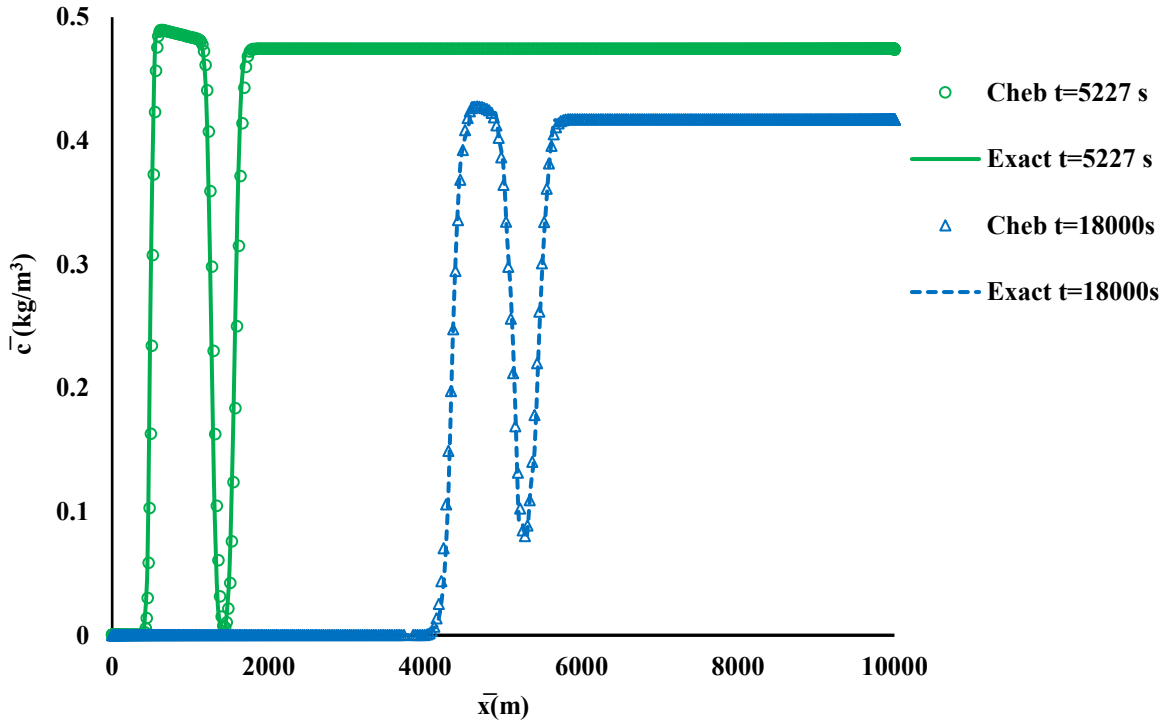
پارامتر	$u(m/s)$	$\bar{D}_x\ (m^2/s)$	$\bar{k}(1/s)$	$t_1\ (s)$	$t_2\ (s)$	$T(hr)$	$\bar{c}_1\ (kg/m^3)$	$\bar{c}_0\ (kg/m^3)$
مقدار	۰/۳	۰/۳	۰/۰۰۰۰۱	۱۰۰۰	۳۶۰۰	۵	۰/۵	۰/۵



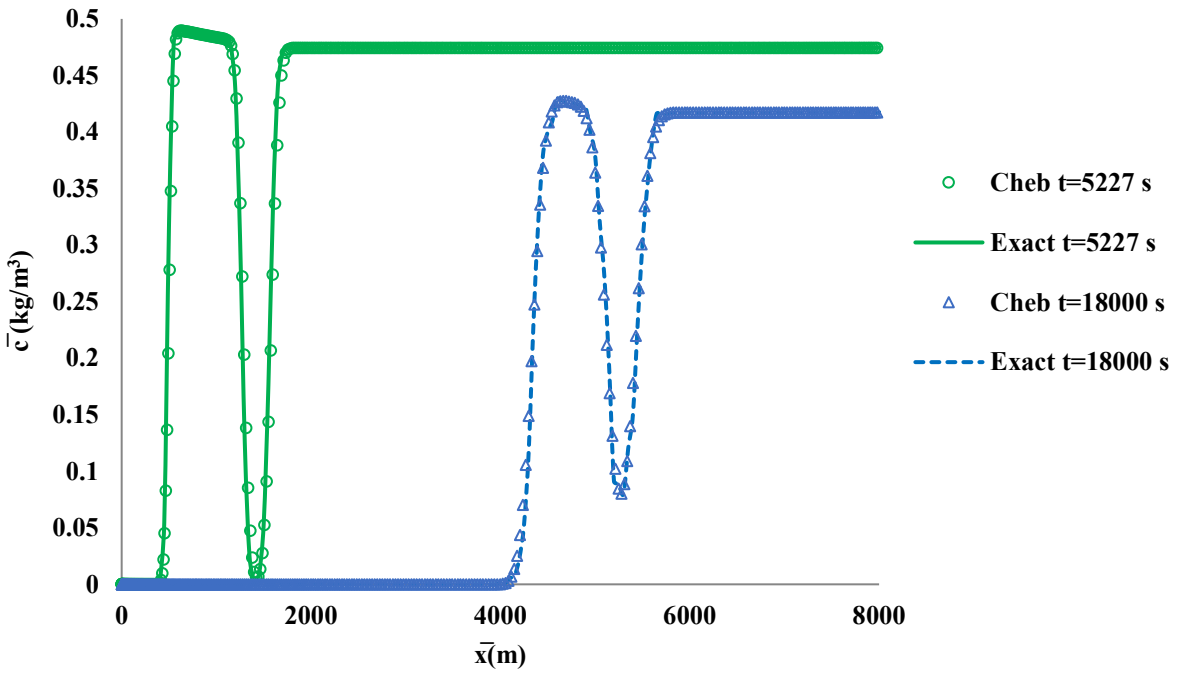
شکل ٦. مقایسه روش طیفی چبیشف با راه حل Van Genachten and Alves(1982) با بارگذاری پله‌ای(حالت اول)



شکل ۷. مقایسه روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف با راه حل Van Genachten and Alves(1982) با بارگذاری پله‌ای(حالت اول)



شکل ۸. مقایسه روش طیفی چبیشف با راه حل Van Genachten and Alves(1982) بارگذاری پله‌ای(حالت دوم)



شکل ۹. مقایسه روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف با راه حل Van Genachten and Alves(1982) بارگذاری پله‌ای(حالت دوم)

بحث

روش‌های طیفی و شبه طیفی که در سال‌های اخیر درحال‌توسعه هستند با استفاده از تعداد گره و زمان کمتر قادر به محاسبه جواب بادقت بالاتر نسبت به روش‌های تحلیلی و عددی هستند. در این پژوهش، حل معادلات آلودگی با استفاده از روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف موردبررسی قرار گرفت و نتایج این روش‌ها با حل تحلیلی در شرایط مرزی مختلف مقایسه شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دقت روش طیفی چبیشف و روش ویسکوزیته فوق طیفی چبیشف برای حل معادلات آلودگی در دو حالت تزریق پیوسته و پله‌ای آلاینده در مقایسه با حل تحلیلی بررسی شد. نتایج این دو روش در حل معادله انتقال نشان داد که با افزایش تعداد نقاط نتایج عددی به حل تحلیلی نزدیک‌تر و در تعداد نقاط یکسان روش فوق طیفی ویسکوزیته چبیشف درستی بالاتری در محاسبه غلظت آلودگی دارد. اما نمودار هیچ یک بر نتایج تحلیلی منطبق نیست. روش‌های ذکر شده برای حل معادلات انتقال – پخش و انتقال – پخش – واکنش در تزریق پله‌ای به کار رفت و با نتایج تحلیلی مقایسه شد. روش فوق طیفی چبیشف با تعداد نقاط یکسان درستی بالاتری را نسبت به روش طیفی چبیشف در حل معادله انتقال – پخش دارد. نتایج این روش بر نتایج تحلیلی کاملاً منطبق هستند. همچنین هر دو روش نتایج یکسانی برای حل معادله انتقال – پخش – واکنش دارند که درستی بالایی در مقایسه با حل تحلیلی دارند. اما روش فوق طیفی چبیشف به دلیل انجام حجم عملیات بیشتر نسبت به روش طیفی چبیشف، سرعت اجرای کمتری دارد.

روش‌های طیفی چبیشف باوجود دقت بالا در حل معادلات آلودگی، تعداد نقاط لازم برای آنها مستقل از طول رودخانه هستند؛ بنابراین در یک طول کوتاه همان تعداد نقاط لازم است که در یک کانال یا رودخانه با طول زیاد لازم است. همچنین تشکیل ماتریس D در زبان‌های برنامه‌نویسی دیگر بسیار پیچیده است که استفاده از این روش‌ها را مشکل خواهد کرد. در این پژوهش معادله یک‌بعدی آلودگی به روش‌های طیفی حل شد که برنامه‌نویسی پیچیده‌ای نسبت به روش‌های دیگر دارد. لازم است دقت این روش‌ها در حالت دوبعدی و حجم برنامه‌نویسی آنها بررسی شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع موردتأیید همه آن‌ها است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور یکسان در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

آژدان، یعقوب.، عمادی، علیرضا.، دانش فراز.، رسول.، و چابک‌پور، جعفر. (۱۳۹۷). ارزیابی برخی از روابط تجربی در پیش‌بینی ضریب پراکندگی طولی. *هفدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران*، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. https://civilica.com/doc/811399

فتاحی چقابگی، علی. (۱۳۹۱). مدل ریاضی شبیه‌سازی انتقال و پخش آلودگی در مجاری روباز. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، *دانشگاه رازی*. کرمانشاه، ایران.

فتحی، نگار.، رحیم پور، مجید.، و رهنما، محمدباقر. (۱۳۹۳). حل عددی معادله پخش انتشار با استفاده از روش اجزاء محدود. *سومین همایش بین المللی سامانه های سطوح آبگیر باران*، بیرجند، ایران. https://civilica.com/doc/919306

فردادی شیل‌سر، محمدجواد.، مظاهری، مهدی.، و محمدولی سامانی، جمال. (۱۴۰۰). حل تحلیلی معادله انتقال آلودگی با ضرایب متغیر در رودخانه با استفاده از تبدیل لاپلاس. مجله *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۱(۴)، ۶۸۳-۶۹۸. https://doi.org/10.22059/jwim.2021.329149.911

محمودیان شوشتری، محمد. (۱۳۸۹). اصول جریان در مجاری روباز. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. https://www. isoom.com/book/1648721

مشهدگرمه، ندا.، محمد ولی سامانی، جمال.، و مظاهری، مهدی. (۱۳۹۲). حل تحلیلی معادله انتقال آلودگی به ازای الگوی زمانی دلخواه منابع آلاینده نقطه‌ای توسط روش تابع گرین، *نشریه هیدرولیک*، ۸(۴)، ۲۵-۱۳. https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.6697

References

Ajdan, Y., Emadi, A., Chabokpour, J., & Daneshfaraz, R. (2018). Evaluation of some empirical relationships in predicting the longitudinal dispersion coefficient. In: *17th National Hydraulic Conference,* Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. https://civilica.com/doc/811399 (In Persian)

Barros, F.P.J. de, Colbrook, M.J., & Fokas, A.S. (2019). A hybrid analytical-numerical method for solving advection-dispersion problems on a half-line. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 482-491. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.018

Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., & Smith, V.H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen, *Ecological Applications*, 8(3), 559-568. https://doi.org/10.2307/2641247

Chapra, S.C. (1997). Surface water-quality modeling. *McGraw-Hill Publications*, New York. https://www.researchgate.net/publication/48447645_Surface_Water-Quality_Modeling

Chen, H., Wu, Y., & Zhao, L. (2019). Application of Finite Volume Method in Groundwater Contamination Simulation. *Journal of Hydrology*, 577, 123-135. https://www.researchgate.net/publication/344599189

Fardadi Shilsar, M. J., Mazaheri, M., & Mohammadvali Samani, J. (1400). Analytical solution of the pollution transfer equation with variable coefficients in a river using Laplace transform. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11(4), 683-698. https://doi.org/10.22059/jwim.2021.329149.911

Fathi, N., Rahimpour, M., & Rahnama, M. B. (2014). Numerical solution of diffusion equation using finite element method. *Third International Conference on Rainwater Catchment Surface Systems*, Birjand, Iran. https://civilica.com/doc/919306

Fattahi Chaqabegi, A. (2012). Mathematical model for simulating the transfer and dispersion of pollution in open channels. Master's thesis. *Razi University*, Kermanshah, Iran. (In Persian)

Gleick, P. H. (2003). Water Use. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 275-314. https://www.researchgate.net/publication/230557561_Water_use

Jamali, N. (2019). Analysis and comparative study of numerical methods to solve ordinary differential equations with initial value problem. *International Journal of Advanced Research*, 7(5), 117-128. http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/9010

Kato, S., Zhang, C., & Kano, M. (2023). Simple algorithm for judging equivalence of differential-algebraic equation systems. *Scientific reports*, 13(1), 11534. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-38254-y

Kilic, M. (2021). Water Pollution: Causes, Negative Effects and Prevention Methods. *Istanbul Sabahattin Zaim University Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(4), 129-132. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1514334

Kumar, A., Singh, R., & Patel, S. (2021). A Comparative Study of Finite Volume and Finite Element Methods for Pollutant Transport Modeling. *Water Resources Management*, 35(10), 3507-3523. http://dx.doi.org/10.1142/S0219876208001522

Kumar, D., Kumar, N., & Yadav, R. (2022). Analytical solution for transport of pollutant from time-dependent locations along groundwater, *Journal of Hydrology*, 610, 0022-1694. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127826

Lapworth, D.J., Baran, N., Stuart, M.E., & Ward, R.S. (2012). Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, 163, 287-303. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034

Mahmoud, A., Abdelrahman, E., Inc, Mustafa, Abdo, N., & Mobarak, M. (2022). New exact solutions for the reaction-diffusion equation in mathematical physics. *Journal of Ocean Engineering and Science*. https://doi.org/10.1016/j.joes.2022.05.006

Mahmoudian Shushtari, M. (2009). Principles of Flow in Open Channels. *Shahid Chamran University of Ahwaz Publications,* Ahvaz, Iran. https://www.gisoom.com/book/1648721 (In Persian)

Meshdgarmeh, N., Mohammadi Vali, S., & Mazaheri, M. (2013). Analytical solution of the pollution transport equation for arbitrary time pattern of point source pollutants using the Green's function method, *Hydraulic Journal*, 8(4), 13-25. https://doi.org/10.30482/jhyd.2014.6697 (In Persian)

Noye, J. (1987). Numerical Methods for Solving the Transport Equation. *North-Holland Mathematics Studies*, North-Holland, 145, 195-229. https://doi.org/10.1016/S0304-0208(08)70035-5

Peyret, R. (2002). Spectral Methods for Incompressible Viscous Flow, *Springer New York*, New York. http://doi.org/10.1007/978-1-4757-6557-1

Sharma, P., (2018). Transport of Contaminants in Groundwater. *ISH Journal of Hydraulic Engineering,* 26*,* 1-10. http://doi.org/10.1080/09715010.2018.1438213

Tadmor, E., (1989). Convergence of spectral methods for nonlinear conservation laws. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 26(1), 30-44. https://www.jstor.org/stable/2157705

Van Genuchten, M. Th., & Alves, W.J. (1982). Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2(7). https://www.researchgate.net/publication/234255114_Analytical_Solutions_of_One_Dimensional_Convective_Dispersive_Solute_Transport_Equations

Yadav, R.R., Jaiswal, D.K. & Yadav, H.K., (2010). Analytical solution of one dimensional temporally dependent advection-dispersion equation in homogeneous porous media. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(5), 141-148. http://doi.org/10.4314/ijest.v2i5.60133

Razi University

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Quantitative assessment of groundwater resources and their relationship with land use changes and climatic factors (Case study: Chamchamal plain)

Mina Nikzad[1]✉, **Hamidreza Moradi**[2], and **Khalil Jalili**[3]

1. Corresponding Author, Department of Watershed management, Faculty of natural resources and marine sciences, Tarbiat modares university, Noor, Iran. E-mail: minanikzad@ymail.com
2. Department of watershed management, Faculty of natural resources and marine sciences, Tarbiat modares university, Noor, Iran. E-mail: hrmoradi@modares.ac.ir
3. Department of Hydraulics and water resources, Academic center for education, Culture and research (ACECR), Kermanshah, Iran. E-mail: jalili@acecr.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 29 March 2025
Received in revised from 02 June 2025
Accepted 05 July 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:
groundwater level,
supervised classification,
drought index,
geostatistics,
Chamchamal plain.

ABSTRACT

Objective The purpose of this study is to analyze the spatiotemporal pattern of groundwater levels using geostatistical methods, investigate the impact of land-use changes on groundwater level fluctuations, and examine hydrological factors (including meteorological drought and groundwater drought) influencing groundwater level variations.

Method: In this study, land use changes and climatic variations were evaluated as the most important human and environmental factors in groundwater level decline, and their relationship with groundwater levels in Chamchamal Plain was examined over a 25-year period. For this purpose, land use maps for three time periods (1990, 2003, and 2015) were obtained from Landsat TM, ETM+, and OLI satellite imagery using the Maximum Likelihood Classification method. Water level data from 21 piezometric wells were interpolated using Ordinary Kriging (OK) with minimum RMSE and MBE. The SPI and GRI indices were used to determine drought and wet periods.

Results: According to the results, agricultural, residential, and industrial areas increased by 2 times, more than 2 times, and more than 8 times, respectively. The maximum groundwater level decline was estimated at 22 meters in the southwestern part of the plain. The water table showed a decreasing trend, with an average decline of about 7 meters across the region. Pearson correlation coefficient between average groundwater level changes and average rainfall indicated that rainfall and groundwater level fluctuations occurred simultaneously with a 2-month lag.

Conclusions: Excessive groundwater extraction during droughts has intensified the decline and prevented recovery during wet periods, resulting in a persistent decreasing trend.

Cite this article: Nikzad, M., Moradi, H., & Jalili, Kh. (2025). Quantitative assessment of groundwater resources and their relationship with land use changes and climatic factors (Case study: Chamchamal plain). *Advanced Technologies in Water Efficiency, 5* (3), 92-113. https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.12081.1164

© The Author(s)
https://doi.org/ 10.22126/atwe.2025.12081.1164

Publisher: Razi University.

Introduction

Groundwater resources are known as valuable environmental sources in arid and semi-arid regions. Today, due to the water shortage crisis, the causes of groundwater depletion and its relationship with environmental changes have been studied. Quantitative assessment of groundwater resources and proper understanding of their relationship with land use changes is essential for planning, managing, and sustainable development of water resources in arid and semi-arid regions. Considering the expansion of urban areas, agriculture, and water-intensive industries and their effects on groundwater levels, this research was conducted to analyze the spatial and temporal patterns of groundwater levels using geostatistical methods, investigate temporal and spatial changes in land use through satellite image processing and their impact on groundwater level fluctuations, and examine hydrological factors including meteorological drought (SPI) and groundwater drought (GRI) and their effects on groundwater levels.

Method

In this study, the impact of land use on the quantity of surface and groundwater resources in the Chamchamal plain of Kermanshah province was examined over a 25-year statistical period. To prepare the land use map of the Chamchamal plain, two methods were used: pixel-based classification and object-based classification. The trend of fluctuations in surface and groundwater resources was analyzed on a monthly, seasonal, and annual scale using the non-parametric Mann-Kendall test and the sen's slope estimator. Consequently, the hydrograph representative of the Chamchamal plain aquifer was drawn up. Different interpolation methods were used for estimating the groundwater level, including ordinary kriging (OK), inverse distance weighting (IDW) with powers ranging from one to five, and co-kriging (CK). The variogram with a Gaussian model was chosen as the best-fit model for the spatial structure of the data, and the kriging method was selected as the most suitable method for estimating groundwater level. Groundwater level mapping was performed annually using the kriging method for the study period. The trend of fluctuations in hydrological factors such as precipitation was examined annually using the non-parametric Mann-Kendall test and the sen's slope estimator. The periods of drought and wetness in the region were determined using the SPI and GRI indices. To investigate the effect of land use on surface and groundwater resources in the study area, a combination of the land use change map and the map of the quantitative changes in groundwater level was utilized.

Results

Based on the results of this study, the area of agricultural, residential, and industrial land has increased, respectively, twofold, more than twofold, and more than eightfold. The decline in groundwater levels in most areas of the plain was estimated to be a maximum of 22 meters in the southwestern part of the plain. The water table level in the region is on a downward trend, with an average drop in groundwater levels of about seven meters. Considering the Pearson correlation coefficient between the average changes in water table levels and average rainfall, the overall trend of the fluctuations in the two curves of rainfall and the groundwater level of the plain has occurred simultaneously but with a two-month delay.

Conclusions

Excessive exploitation of groundwater resources during droughts has intensified the decline and has resulted in a lasting downward trend that cannot be compensated for even during wet periods. If the current trend continues, it could lead the plain to face challenges

such as land subsidence, increased depletion of groundwater, and consequently a further decline in the water table level along with a reduction in the quality of groundwater resources.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: دشت چمچمال)

مینا نیکزاد[۱]، حمیدرضا مرادی[۲]، خلیل جلیلی[۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت‌مدرس، نور، ایران. minanikzad@ymail.com
۲. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت‌مدرس، نور، ایران. hrmoradi@modares.ac.ir
۳. گروه هیدرولیک و منابع آب، جهاد دانشگاهی، کرمانشاه، ایران. jalili@acecr.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:
سطح آب زیرزمینی،
طبقه‌بندی نظارت شده،
شاخص خشکسالی،
زمین‌آمار،
دشت بیستون.

چکیده

هدف: هدف این مطالعه تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی و زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری، بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی کاربری اراضی و تأثیر آن بر میزان نوسانات تراز آب زیرزمینی و بررسی عوامل هیدرولوژیکی نظیر خشکسالی هواشناسی و زیرزمینی و تأثیر این عوامل بر سطح آب زیرزمینی است.

روش پژوهش: در این تحقیق تغییرات کاربری اراضی و نوسانات اقلیمی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل انسانی و محیطی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ارزیابی و سپس ارتباط این عوامل با سطح آب زیرزمینی دشت بیستون در یک دوره ۲۵ساله آماری بررسی شد. برای این منظور نقشه کاربری اراضی در سه دوره زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵، از تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست و با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال به دست آمد. آمار سطح ایستابی ۲۱ حلقه چاه پیزومتری، با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی (OK) با کمترین میزان RMSE و MBE استفاده شد. برای تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی از شاخص SPI و GRI استفاده شد. برای بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی، از هم‌پوشانی و تلفیق نقشه تغییرات کاربری اراضی در دوره آماری موردمطالعه و نقشه تغییرات کمی افت سطح ایستابی در همین سال‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج این مطالعه وسعت اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی به ترتیب دوبرابر، بیش از دوبرابر و بیش از هشت برابر شده است. همچنین افت سطح آب زیرزمینی در بیشتر نقاط دشت و بیشینه آن معادل ۲۲ متر در قسمت جنوب غربی دشت برآورد شده است. سطح تراز آب در منطقه روند نزولی داشته و متوسط افت تراز آب زیرزمینی در سطح منطقه حدود هفت متر برآورد شده است. باتوجه‌به ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های میانگین تغییرات سطح ایستابی و میانگین بارندگی، روند کلی فراز و نشیب‌های دو منحنی بارندگی و تراز آبخوان دشت هم‌زمان و با تأخیر دوماهه اتفاق افتاده است.

نتیجه‌گیری: بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در هنگام وقوع خشکسالی میزان افت را تشدید نموده و موجب شده است تا در دوره ترسالی هم جبران نشود و روند نزولی پایداری پدید آید.

استناد: نیکزاد، مینا؛ مرادی، حمیدرضا؛ و جلیلی، خلیل. (۱۴۰۴). ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: دشت چمچمال). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب* ، ۵ (۳)، ۱۱۳-۹۲.
https//doi.org/ 10.22126/atwe.2025.12081.1164

شر: دانشگاه رازی. © نویسندگان CC BY NC

مقدمه

منابع آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع ارزشمند محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخته شده و حیات حدود ۲ میلیارد نفر در سراسر دنیا به این منابع وابسته است(برنامه ارزیابی جهانی آب سازمان ملل، [1] ۲۰۱۵). اما امروزه به دلیل بحران کمبود آب، بررسی علت کاهش منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات زیست محیطی بیش از هر زمان دیگری توسط محققان موردبررسی قرار گرفته است (لی و همکاران[2]، ۲۰۰۷). در مناطقی که آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و تغییرات آب‌وهوایی قرار می‌گیرند، مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی چالش بر انگیز و مهم تلقی می‌شود (کارمونا و همکاران[3]، ۲۰۱۳). لذا داشتن درک دقیقی از تغییرات مکانی و زمانی آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی برای آگاهی از وضعیت منابع آبی منطقه و اطمینان از پایداری اکوسیستم و مدیریت جامع آنها ضروری است (شیائو و همکاران[4]، ۲۰۰۶). در بسیاری از مطالعات اثر تغییر کاربری و تغییرات آب‌وهوایی بر روی منابع آب‌های زیرزمینی نادیده گرفته شده و بیشتر بر روی منابع آب های سطحی پراخته شده است (گلیسون و همکاران[5]، ۲۰۱۲). با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که منابع آب‌های زیرزمینی نیز به علت تغییرات کاربری اراضی آسیب پذیر هستند (ژو و همکاران[6]، ۲۰۱۲؛ امینی و حسامی، ۲۰۱۷؛ و نارانی و همکاران، ۲۰۱۷) گسترش شهر نشینی و صنعتی شدن، توسعه زمین‌های کشاورزی، جنگل زدایی، ساخت جاده نمونه هایی از فعالیت‌های انسانی هستند که منجر به تغییرات زیست محیطی و تغیرات اقلیمی می‌شوند و منابع طبیعی جهان از جمله آب‌های زیرزمینی را متاثر می کنند (دنگ و شانگوان[7]، ۲۰۱۶؛ و کیلر و پولاسکی[8]، ۲۰۱۴). از این‌رو ارزیابی کمیت منابع آب زیرزمینی و درک صحیح رابطه آن با تغییرات کاربری اراضی برای برنامه‌ریزی، مدیریت و توسعه پایدار منابع آب در در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است (شیهدک و همکاران[9]، ۲۰۰۸؛ و وانگ و همکاران[10]، ۲۰۱۵)

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت‌گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

امرایی (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای با عنوان آشکارسازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر افت سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند دریافتند که سطح ایستابی این منطقه در دوره ۱۳۷۰–۱۳۹۵ با شیب سالانه ۴۷ سانتیمتر کاهش‌یافته است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد تحت سناریوهای تغییر اقلیم، سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۶۵ بین ۱۰ تا ۱۳ متر دیگر افت خواهد کرد که عمدتاً ناشی از کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق است. آریا صدر و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز چم انجیر نشان دادند که افزایش برداشت از چاه‌ها، کاهش بارندگی و افزایش دما منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش شاخص‌های شیمیایی کیفیت آب مانند SAR و Na شده است. نتایج پیش‌بینی‌ها حاکی از کاهش کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در آینده است که لزوم مدیریت یکپارچه منابع آب، اصلاح الگوی کشت و بهبود راندمان آبیاری را ضروری می‌سازد.

1. WWAP
2. Lee et al
3. Carmona et al
4. Xiao et al
5. Gleeson et al
6. Zhou et al
7. Deng & Shangguan
8. Keeler & Polasky
9. Schiedek et al
10. Wang et al

عمادالدین و نظری‌گزیک (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان برآورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی، با به‌کارگیری داده‌های ماهوارهٔ Sentinel-1A طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ به بررسی نرخ فرونشست در این منطقه پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد در طول دوره مطالعاتی، حدود ۶۴ سانتی‌متر فرونشست در دشت مشهد رخ داده است. پژوهشگران با تحلیل داده‌های چاه‌های پیزومتری در بازهٔ زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ دریافتند که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی به همراه با عوامل دیگری همچون کاهش بارندگی، خشکسالی، کشت محصولات آب‌بر مانند برنج و وجود بافت خاک ریزدانه در مناطقی باضخامت زیاد آبرفت، از مهم‌ترین دلایل وقوع فرونشست در این منطقه بوده‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که بیشترین نرخ فرونشست دقیقاً در مناطقی رخ داده که با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است.

اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری SBAS و تصاویر سنتینل۱ به بررسی جابه‌جایی‌های سطح زمین پرداختند. این مطالعه باهدف تحلیل ارتباط بین فرونشست زمین، تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و رویداد زلزله آبان ۱۳۹۸ انجام شد. نتایج نشان داد که میزان فرونشست در مناطق کشاورزی و مراتع به ۹ سانتی‌متر در سال می‌رسد، درحالی‌که در برخی نقاط بالاآمدگی تا ۱۲ سانتی‌متر مشاهده شد. پژوهشگران دریافتند که اگرچه رابطه مستقیمی بین برداشت از آب‌های زیرزمینی و فرونشست وجود دارد، اما تغییرات ناگهانی پس از زلزله نشان‌دهنده تأثیر غالب این رویداد لرزه‌ای بر تغییرات ارتفاعی منطقه است.

نامی و نادری (۱۴۰۳) بررسی میزان فرونشست کلان‌شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی پراکنش‌گر دائم و تصاویر راداری سنتینل-۱ با استفاده از پردازش ۳۱تصویر ماهواره سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی پراکنشگر دائم به بررسی نرخ فرونشست کلانشهر تهران پرداختند، یافته‌ها نشان داد بیشترین نرخ فرونشست با ۴۳ میلی‌متر در سال در مناطق جنوب و جنوب‌غربی تهران رخ داده است که با مناطقی که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی را داشته‌اند، انطباق فضایی کامل دارد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل تشدید این پدیده در تهران است که نیازمند مدیریت فوری است.

۲. مطالعات خارجی

بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر تغذیه آب زیرزمینی در هند توسط میشرا و کومار[1] (۲۰۱۵)، نشان داد افزایش در اراضی مسکونی و کاهش پوشش گیاهی به‌طور مستقیم بر کاهش سطح آب زیرزمینی اثر گذار بوده است.

نتایج مطالعات عمیش و همکاران[2] (۲۰۱۶) در ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر تغییرات سطح آبخوان با استفاده از سنجش‌ازدور در مصر نشان داد بیشترین تغییر کاربری اراضی مربوط به تبدیل اراضی بایر به زراعی و همچنین گسترش اراضی مسکونی بوده است که با حداکثر افت سطح آب زیرزمینی از سه تا ۱۳ متر در طول دوره موردمطالعه همراه بوده است.

اثر تغییر کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی شهرستان لینسه (در کشور اتریش) توسط وانگ و همکاران[3] (۲۰۱۶) بررسی گردید و از روش کریجینگ معمولی و مدل نمایی برای پهنه‌بندی مکانی داده‌های آب زیرزمینی و مقایسه و تحلیل تأثیر کاربری بر عمق آب زیرزمینی استفاده شد، در این منطقه به دلیل رشد صنعتی و توسعه کشاورزی، عمق آب زیرزمینی به میزان پنج‌متر کاهش‌یافته است.

لیو و همکاران[4] (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییرات کاربری اراضی و تغییرپذیری اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه‌ی فلات لُس چین نشان دادند تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی به طور معنی‌دار موجب کاهش رواناب و رطوبت خاک و

1. Mishra& Kumar
2. Ammeish et al
3. Wang et al
4. Liu et al

تبخیر و تعرق شده است و در نهایت تأثیر غالب تغییرات اقلیمی نسبت به تغییر کاربری اراضی بر منابع آب سطحی را تایید می‌کند. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی SWAT و تحلیل‌های آماری چند متغیره انجام شد.

آیت مبارک و همکاران[1] (۲۰۲۴) در مطالعه ای با عنوان تأثیر ترکیبی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییرات کاربری زمین بر منابع آب در یک حوضه آبریز نیمه‌خشک، با استفاده از سناریوهای تغییراقلیم و تغییرات کاربری اراضی نشان دادند کاهش بارندگی و افزایش دما با تبدیل اراضی کشاورزی و جنگلی به بایر موجب کاهش رواناب سطحی و همچنین کاهش تغذیه آبخوان شده است.

سجاد و همکاران[2] (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری زمین بر منابع آب زیرزمینی، مطالعه منطقه فیصل‌آباد پاکستان، نشان دادند گسترش مناطق شهری و برداشت بی رویه موجب افت سالانه۰.۱۱ متری سطح آب زیرزمینی شده است. اگرچه تغییرات اقلیمی تأثیر کمتری داشتند؛ اما تحلیل‌های فضایی حاکی از ارتباط معنادار بین توسعه شهری و کاهش منابع آب زیرزمینی بوده است.

کوچان و همکاران[3] (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی بین‌حوزه‌ای برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی و مدیریت زمین بر منابع آب‌های زیرزمینی، با استفاده از یک رویکرد مدلسازی تلفیقی و باهدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تولیدات کشاورزی، تقاضای آب برای آبیاری، رواناب و پویایی آب‌های زیرزمینی و همچنین تأثیر ترکیبی تغییرات اقلیمی و تغییرات در مصرف آب کشاورزی بر پویایی آب‌های زیرزمینی انجام شد، نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه کاهش بارش‌های تابستانی بر افت سطح آب‌های زیرزمینی است که با مدیریت آبیاری می‌توان آن‌را کنترل کرد.

ایندانو و همکاران[4] (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی فضایی تأثیرات تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین بر تغذیه آب زیرزمینی در حوضه هت یای تایلند با استفاده از مدل‌های MODFLOW و WetSpass نشان دادند گسترش مناطق شهری موجب کاهش ۳۰ درصدی نرخ تغذیه آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی شده است. درحالی‌که افزایش پوشش گیاهی پایدار مانند جنگل اثر معکوس داشته.

بامال و همکاران[5] (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان بهره‌گیری از یادگیری ماشین برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی، با بررسی ۶۵ مقاله پژوهشی (۲۰۲۳-۲۰۱۷) نشان دادند که روش‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی ابزارهای مؤثری برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی (دما، بارش) بر پارامترهای آب زیرزمینی (سطح، کیفیت و ذخیره) هستند.

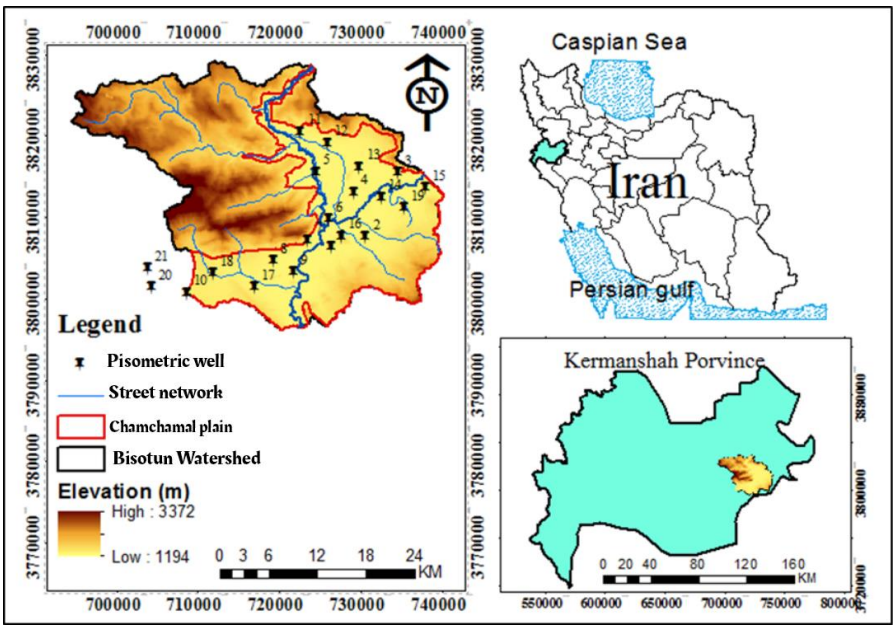
تحقیقات حجازیان و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات تغییرات استفاده از زمین و مدیریت تغذیه آبخوان در عرضه آب‌های زیرزمینی و تحقیقات کورودا و همکاران[6] (۲۰۱۷) به بررسی اثر تغییر کاربری اراضی ناشی از شهرنشینی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی اشاره دارند.

مطالعات اخیر به‌وضوح نشان می‌دهند که تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی تأثیر مستقیمی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی دارند. به‌طور خاص، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و شهری به همراه کاهش بارش‌ها منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف جهان شده است. این یافته‌ها با شرایط دشت چمچمال که در این پژوهش موردمطالعه قرار گرفته است، همخوانی دارد. پژوهش حاضر باتکیه‌بر روش‌های نوین سنجش‌ازدور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به بررسی دقیق‌تر این عوامل در منطقه موردمطالعه می‌پردازد. این یافته‌ها برای توسعه مدل‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی حیاتی هستند

1. Ait M'Barek et al
2. Sajjad et al
3. Cochand et al
4. Indhanu et al
5. Bamal et al
6. Kuroda et al

روش پژوهش

منطقه موردمطالعه در این پژوهش دشت بیستون با مختصات جغرافیایی ´۱۶°۴۷ تا ´۳۶°۴۷ طول شرقی و ´۱۷°۳۴ تا ´۳۴°۳۴ عرض شمالی در حوزه آبخیز بیستون با مختصات جغرافیایی ´۷/۷°۴۷ تا ´۳۶°۴۷ طول شرقی و ´۱۶°۳۴ تا ´۳۴°۳۴ عرض شمالی، در شرق استان کرمانشاه واقع شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. وسعت حوزه آبخیز بیستون ۸۷/۶ کیلومترمربع است که ۳۹/۴ کیلومتر مربع آن را منطقه دشتی و بقیه کوهستانی است. آب و هوای منطقه معتدل و کوهستانی است و بارندگی متوسط سالانه حدود ۳۵۰ میلی‌متر است. رودخانه‌های گاماسیاب و دینور از میانه این دشت عبور می‌کنند.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی منطقه موردمطالعه

۱. داده‌های مورداستفاده

برای انجام تحقیق حاضر، داده‌های تراز آب زیرزمینی مربوط به ۲۱ حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در دشت بیستون در دوره آماری ۲۵ساله جمع آوری شد. به‌منظور بررسی خشک‌سالی هواشناسی داده‌های بارندگی ماهانه در این دوره تهیه شد. پس از انتخاب پایه زمانی مشترک و کنترل کیفیت و صحت آمار، با استفاده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف آزمون نرمالیته در محیط نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی در دوره ۲۵ساله موردمطالعه، با در نظر گرفتن این نکته که تصاویر باید متعلق به یک دوره زمانی مشخص و هم‌زمان در یک ماه بخصوص باشند که بیش‌ترین تفاوت در عارضه‌ها را نمایان سازند، تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست به ترتیب مربوط به روزهای ۱۹۹۱/۰۶/۵، ۲۰۰۳/۰۶/۱۳ و ۲۰۱۵/۰۶/۷ از سایت USGS استفاده شد.

۲. پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی

برای تعیین تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان افت سطح آب در هر پیزومتر، با کم‌کردن داده‌های سطح آب زیرزمینی هر یک از چاه‌ها از ارتفاع سطح زمین آن‌ها نسبت به سطح دریا، تراز سطح آب زیرزمینی (ارتفاع پیزومتری) هر یک از چاه‌ها محاسبه شد و به‌صورت لایه‌ای نقطه‌ای وارد نرم‌افزار ArcGIS شد. در پژوهش حاضر از روش‌های زمین‌آماری برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شد.

۳. روش‌های زمین‌آماری مورداستفاده

باتوجه‌به اینکه آگاهی از مدل نیم‌تغییرنمای تجربی[1] دقیق به کمک بهترین روش تخمین‌گر زمین‌آماری می‌تواند برآورد صحیحی در بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب‌های زیرزمینی ارائه دهد (ارسلان[2]، ۲۰۱۴). در این مطالعه روش‌های مختلف زمین‌آماری (OK[3]، IDW[4] و COK[5]) برای پیش‌بینی تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفت. برای بررسی تغییرات مکانی از نرم‌افزار $GS^{+}5.1$ و برای تهیه نقشه پهنه‌بندی از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد.

کریجینگ معمولی (OK)

روش کریجینگ معمولی از مهم‌ترین و مرسوم‌ترین روش‌های تخمین زمین‌آماری است. این روش متکی بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار و بهترین تخمین‌گر خطی نااریب است (کریستکاوس[6]، ۲۰۰۰) که علاوه بر مقادیر تخمین، میزان خطای تخمین در هر نقطه را نیز مشخص می‌کند (گووارست[7]، ۱۹۹۷). فرمول مورداستفاده برای تخمین در روش کریجینگ معمولی مطابق رابطه (۱) است:

$$Z^{*}(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i\, z(xi) \qquad (۱)$$

که در آن: $z^{*}(x0)$: مقدار تخمین زده شده متغیر z در نقطه‌ای به مختصات X0. $z(x_i)$: مقدار مشاهده شده متغیر z در نقطه xi و n تعداد مشاهدات است (دلبری و همکاران، ۲۰۱۳).

وزن‌دهی عکس فاصله (IDW)

در این روش نیز همچون روش کریجینگ، مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که نمونه‌برداری نشده باشد، از روی نقاط مجاورش، با استفاده از رابطه (۲) تخمین زده می‌شود. در این روش وزن‌ها باتوجه‌به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به موقعیت و چگونگی پراکندگی نقاط حول نقطه تخمین، تعیین می‌شوند. بدین‌ترتیب که به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می‌شود (گووارست، ۱۹۹۷).

$$\lambda = \frac{D_i^{-\Pi}}{\sum_{i=1}^{n} D_i^{-\Pi^{i}}} \qquad (۲)$$

که در آن: $Di^{-\pi i}$: فاصله نقطه i ام تا نقطه تخمین زده شده. π: توان وزن‌دهی فاصله. n: تعداد مشاهدات است. در این تحقیق از توان یک تا پنج برای تخمین استفاده شد.

کوکریجینگ

تخمین‌گر کوکریجینگ همان کریجینگ توسعه‌یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است. با بهره‌گیری از مقادیر متغیر ثانویه یا کمکی و با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به همبستگی دوجانبه بین متغیرها، می‌توان تخمین مناسب و دقیق‌تری از متغیر اصلی به دست آورد. این تخمین‌گر طبق رابطه (۳) محاسبه شد (گووارست، ۱۹۹۷).

$$Z_v^{*}(u_0) \sum_{i=1}^{N} [a_i\, Z_v(u_i) + \beta_i Z_w(u_i) \qquad (۳)$$

1. Experimental semivariogram
2. Arslan
3. Ordinary Kriging (OK)
4. Inverse Distance Weighted (IDW)
5. CO-Kriging (COK)
6. Christakos
7. Goovaerts

که در آن: $Z_v^*(u_0)$: مقدار تخمین زده شده‌ی متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_0 است. a_i: وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ای متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_i است. β_i: وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ی متغیر کمکی Z_w در موقعیت u_i. N: تعداد مشاهدات در اطراف نقطه‌ی مورد تخمین است. در روش کوکریجینگ از متغیر کمکی ارتفاع معادل هرچاه به‌عنوان متغیر ثانویه استفاده شد. در مطالعه حاضر، روش OK، به‌عنوان مناسب‌ترین روش مورداستفاده در بررسی‌های زمین‌آماری، انتخاب شد (جمک و همکاران[1]، ۲۰۰۷؛ و ژو و همکاران[2]، ۲۰۱۲).

مدل‌های نیم‌تغییرنما

نیم‌تغییرنما متداول‌ترین ابزاری است که همبستگی مکانی را در زمین‌آمار بررسی می‌کند (کومار و همکاران[3]،۲۰۰۵) نیم‌تغییرنما میزان عدم تشابه را بین مقادیر یک ویژگی هنگامی که فاصله بین نمونه‌ها افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی نیم‌تغییرنمای تجربی از رابطه (۴) استفاده شد (ایزاک و سریواستاوا[4]، ۱۹۸۹).

$$\gamma\,(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n} [z(x+h) - z(x)]^2 \qquad (۴)$$

که در آن $\gamma(h)$: مقدار واریوگرام برای جفت نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند .n(h) : تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته به ازاء یک فاصله h از هم قرار دارند. z(x): متغیر مشاهده شده در نقطهx. z(x+h) : مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله h از x قرار دارد.

برای دست‌یابی به یک درون‌یابی صحیح، مهم‌ترین گام برازش مدلی مناسب بر سمیوواریوگرام است. مدل‌های سمیوواریوگرام برازش داده شده در این پژوهش شامل مدل‌های نمایی، گوسی، کروی و خطی است.

مقایسه روش‌های درون‌یابی

برای بررسی دقّت روش‌های درون‌یابی استفاده شده در تخمین تراز سطح ایستابی از روش اعتبارسنجی متقابل[5] استفاده شد (ایزاک و سریواستاوا، ۱۹۸۹). در فرآیند انجام این روش هر بار یک نقطه مشاهده‌ای به‌طور موقت حذف شده و برای آن از روی نقاط مجاور، مقداری برآورد شد. سپس مقدار حذف شده به‌جای خود برگردانده شد و برای بقیه نقاط شبکه، به‌صورت مجزا این برآورد صورت گرفت. با داشتن این مقادیر باتوجه‌به مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده، میانگین مربعات خطا (RMSE)[6] و میانگین انحراف معیار خطا (MBE)[7] در هر روش بر اساس رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شد. این عمل در محیط نرم‌افزاری GS+ انجام شد.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i) - z(x_i))^2}{n}} \qquad (۵)$$

$$\mathrm{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i) - z(x_i))}{n} \qquad (۶)$$

که در آن: $z^*(x_i)$ و $z(x_i)$: به ترتیب مقدار تخمینی و واقعی متغیر z در نقطه x_i هستند.

۴. تهیه نقشه کاربری اراضی

برای بررسی تغییرات کاربری اراضی منطقه تصاویر سنجنده‌های TM، ETM^+ و OLI ماهواره لندست به ترتیب مربوط به روزهای ۱۹۹۱/۰۶/۵، ۲۰۰۳/۶/۱۳ و ۲۰۱۵/۰۶/۷ از سایت USGS دانلود و در نرم‌افزار Idrisi موردبررسی قرار گرفت. برای

1. Cemek et al
2. Zhou et al
3. Kumar et al
4. Issaks & Srivastava
5. CrossValidation
6. Root mean square error
7. Mean Bias Error

تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی نظارت شده[1] و روش حداکثر احتمال استفاده شد. نمونه‌های تعلیمی به روش تصادفی ساده برای کاربری‌های مختلف انتخاب شدند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۵). برای ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی ضریب کاپا و دقت کلی محاسبه شد (ریچاردز و جیا[2]، ۲۰۰۵). ضریب کاپا از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} X_{ii} - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}(X_{i+} * X_{+i})} \quad (۷)$$

که در آن: N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی، Xi+ مجموع عناصر سطر i ام و X+i مجموع عناصر ستون i ام هستند. به‌منظور محاسبه مساحت کاربری‌ها و تهیه نقشه خروجی از نرم‌افزار Arc GIS استفاده گردید. کاربری‌ها منطقه موردمطالعه شامل ۶ طبقه (بایر و رخنمون سنگی، مرتع، کشاورزی، مسکونی، پهنه آبی (رودخانه) و صنایع می باشند. سپس با استفاده از روش Cross Tabulation که در واقع یکی از بهترین روش‌های مقایسه پس از طبقه‌بندی در آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی است، لایه‌های کاربری اراضی تهیه شده، به‌صورت ماتریسی و دو به دو در محیط نرم‌افزار IDRISI با یکدیگر مقایسه و میزان و روند تغییرات در کاربری‌ها تعیین گردید.

۵. نوسانات آب‌وهوایی

باتوجه‌به اینکه عامل اصلی و مهم تغذیه‌ی آبخوان‌ها، نفوذ آب حاصل از بارندگی به درون زمین است. میزان تغذیه آبخوان در هر سال تابع تغییرات بارندگی سالانه است. از مهم‌ترین شاخص‌های مطالعه بارندگی، شاخص بارندگی استاندارد است که توسط (مک کی و همکاران[3]، ۱۹۹۳) تهیه شده است. در پژوهش حاضر ابتدا SPI به‌عنوان نمایه‌ی خشک‌سالی اقلیمی استاندارد شده (مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) و GRI به‌عنوان شاخص منابع آب زیرزمینی محاسبه شد (شیرمحمدی و همکاران، ۲۰۱۳) (جدول ۱) همچنین برای بررسی ارتباط آب زیرزمینی و بارندگی از روش شبکه‌بندی تیسن و آزمون پیرسون استفاده شد.

جدول۱. وضعیت خشک‌سالی و ترسالی‌ها بر حسب مقادیر SPI و GRI (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ و مندیچینو و همکاران[4]، ۲۰۰۸).

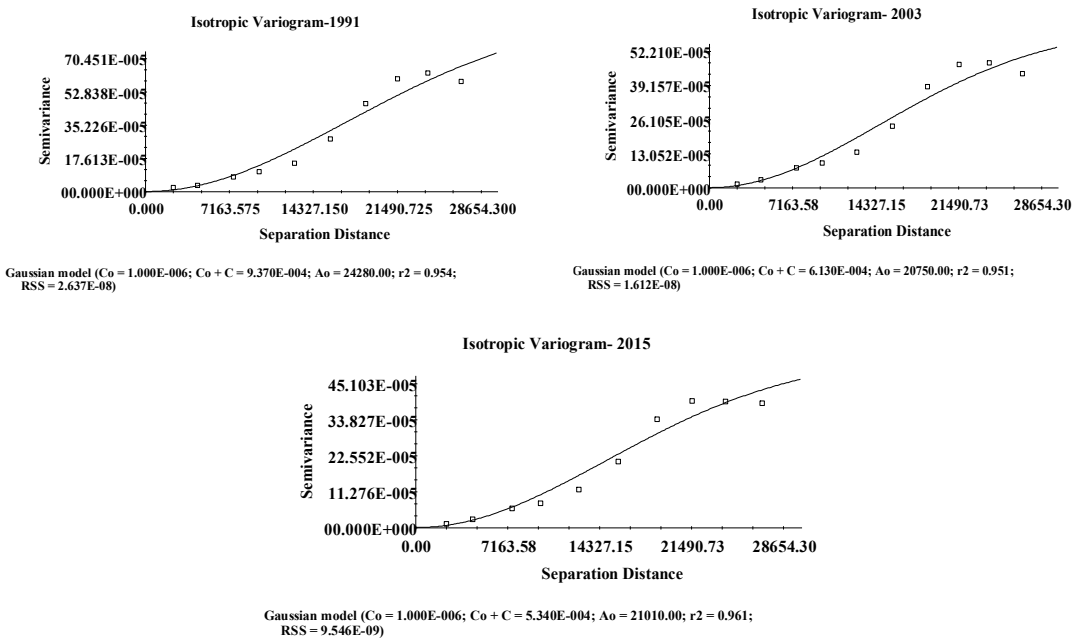
طبقات	وضعیت	مقادیر SPI	مقادیر GRI
1	ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر	۲ و بیشتر
2	ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹
3	ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹
4	نزدیک به نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-
5	خشک‌سالی متوسط	۱/۴۹- تا ۱-	۱/۴۹- تا ۱-
6	خشک‌سالی شدید	۱/۹۹- تا ۱/۵-	۱/۹۹- تا ۱/۵-
7	خشک‌سالی بسیار شدید	۲- و کمتر	۲- و کمتر

1. supervised classification
2. Richards & Jia
3. McKee et al
4. Mendicino et al

یافته‌های پژوهش

۱. تحلیل تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی

در این تحقیق، تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش زمین‌آماری و مدل واریوگرامی پیش‌بینی و تجزیه‌وتحلیل شد. نتایج برازش مدل‌ها به نیم‌تغییرنما نشان داد مدل گوسی برای توصیف ساختار مکانی آب زیرزمینی در این منطقه مناسب است که در شکل (۲) نشان‌داده‌شده است.



شکل۲. نیم‌تغییرنمای تجربی (مربع تو خالی) و بهترین مدل برازش شده مربوط به سطح آب زیرزمینی

شکل (۲) نشان می‌دهد نیم‌تغییرنما دارای اثر قطعه‌ای (C_0) ناچیز است که نشان‌دهنده پیوستگی سطح آب زیرزمینی و نیز تغییر پذیری اندک در مبدا نیم‌تغییرنما است. مقادیر بالای نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه یا واریانس کل ((C/C_0+C)) و نزدیک بودن آن به عدد یک نشان دهنده‌ی ساختار مکانی قوی برای سطح آب زیرزمینی در سال‌های موردبررسی است. شعاع تأثیر ارتفاع سطح ایستابی از ۲۴۲۸۰ متر در سال ۱۹۹۱ به ۲۰۰۱۰ متر در سال ۲۰۱۵ کاهش‌یافته است. علت کاهش دامنه تأثیر (A_0) افت سطح ایستابی است. در واقع، فاصله‌ای که بتوان متغیر مجهول را تخمین زد در سال‌های آخر دوره موردمطالعه کمتر شده است. همچنین مناسب‌ترین مدل باتوجه‌به، مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و ضریب هبستگی (R^2) تعیین می‌گردد (ایزاک و سرپواستاوار ۱۹۸۹؛ و گووارتس پی، ۱۹۹۷).

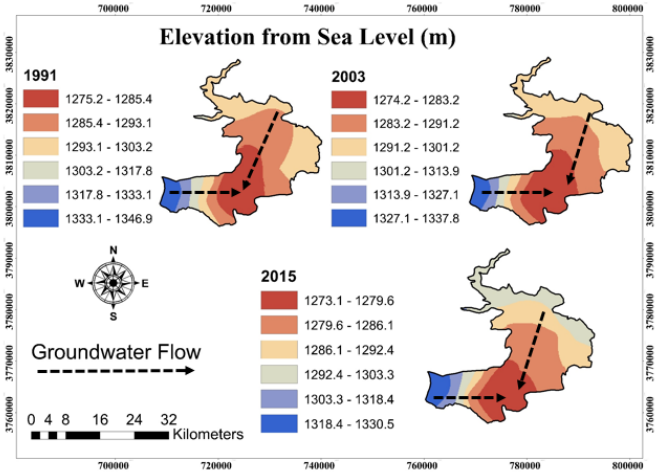
جدول۲. مقادیر RMSE و MBE هر یک از روش‌های میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در دوره آماری

Models	Power/variogram function	MBE	RMSE	R2	MBE	RMSE	R^2	MBE	RMSE	R^2
		1991			2003			2015		
OK	Gaussian	0.40	4.7	0/95	0.49	5.02	0/96	0.02	5.46	0/94
IDW	1	-4.42	13.87	0.8	-4	12.71	0.77	-3.68	11.99	0.76
IDW	2	-2.44	9	0.82	-2.11	8.59	0.77	-1.88	8.3	0.78
IDW	3	-1.69	7.02	0.84	-1.34	6.96	0.78	-1.13	6.79	0.78
IDW	4	-1.41	6.18	0.88	-1.03	6.4	0.8	-0.83	6.1	0.8
IDW	5	-1.25	5.97	0.89	-0.86	6.26	0.82	-0.67	5.75	0.84
COK	Gaussian	-0.41	6.57.	0.92	-0.25	6.9	0.93	-0.2	7.01	0.9

باتوجه‌به نتایج ارائه شده جدول (۲)، روش کریجینگ معمولی با مدل برازش داده شده گوسی با کم‌ترین میزان RMSE و MBE، و بیشترین مقدار R^2 بهترین برآورد را در منطقه داشته است. نتایج مشابهی در تحقیقات (کامبهامتو و همکاران[1] ۲۰۱۱؛ عمران[2]، ۲۰۱۲) گزارش شده است. روش وزن‌دهی‌عکس فاصله (توان یک) نامناسب‌ترین تخمین را در برآورد سطح ایستابی داشته است. با افزایش توان وزن‌دهی به دلیل افزایش شعاع تحت تأثیر، صحت درون‌یابی افزایش یافته است. بررسی‌ها نشان داد روش وزن‌دهی عکس‌فاصله با توان پنج نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می‌کند.

۲. نقشه سطح آب زیرزمینی

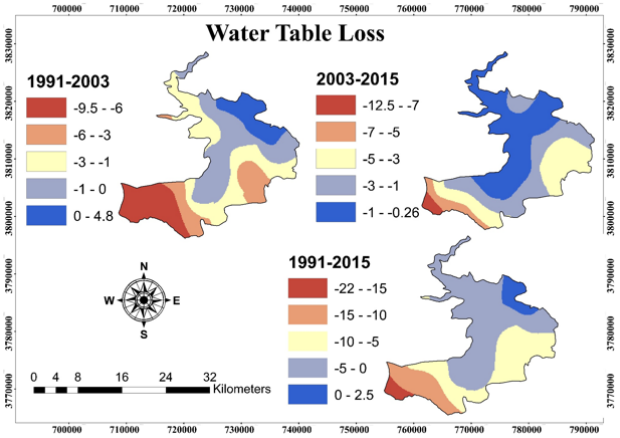
پس از انتخاب بهترین روش درون‌یابی و مدل واریوگرامی مناسب و عامل‌های آن در نرم‌افزار GS^+، نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم و در نهایت نقشه هم‌افت آب زیرزمینی برای سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵ تهیه شد.



شکل ۳. نقشه سطح آب زیرزمینی

به‌طورکلی از نظر مکانی، جهت جریان آب زیرزمینی از سمت غرب و جنوب غرب و همچنین از سمت شرق و شمال شرق به سمت جنوب و نقطه خروجی دشت است که در شکل(۳) نشان داده شده است. دلیل اصلی این امر بالابودن ارتفاع مناطق مذکور در مقایسه با بخش خروجی جریان و درنتیجه تبعیت از توپوگرافی منطقه و گرادیان شیب است. از سویی دیگر جهت حرکت آب زیرزمینی نیز نشان می‌دهد آب از نواحی اطراف آبخوان به مرکز آبخوان در حرکت است؛ ازاین‌رو لازم است بر روند برداشت آب زیرزمینی مدیریت قاطع اعمال داشت، زیرا کف کنی و افزایش برداشت توسط چاه‌های مرکزی دشت، به‌شدت به ضرر چاه‌های حاشیه‌های دشت است و موجب خشک‌شدن آن‌ها می‌شود. پس از پهنه‌بندی مکانی سطح تراز آب زیرزمینی در مقیاس سالانه، از تفاضل نقشه‌های تهیه شده در ابتدا و انتهای دوره موردمطالعه، نقشه هم‌افت آب زیرزمینی دشت موردمطالعه به دست آمد و مکان‌هایی از آبخوان دشت که بیشترین افت را داشتند مشخص شد و در شکل (۴) آورده شده است.

1. Kambhammettu et al
2. Omran



شکل ٤. منطقه بندی افت سطح آب زیرزمینی

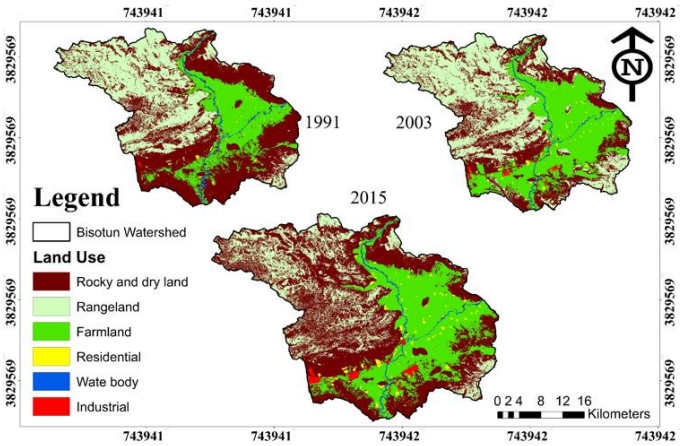
نتایج حاصل از بررسی نقشه‌های هم افت آب زیرزمینی نشان‌دهنده افت سطح ایستابی در اکثر قسمت‌های منطقه موردمطالعه است. تغییرات کمی افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۲۰۰۳–۱۹۹۱ حاکی از آن است که در قسمت شرقی و شمال شرقی (ورودی رودخانه)، دارای افزایش سطح ایستابی صفر تا ۴/۸۸ متر است. به این ترتیب، بخش شرقی دشت به‌علت ورود رودخانه به منطقه، سطح آب چاه‌های پیزومتری دارای بالا آمدگی است. درحالی‌که در قسمت مرکزی، جنوب و جنوب غربی دشت افت آب زیرزمینی شدت یافته است دلیل آن‌را می‌توان برداشت‌های بی‌رویه از رودخانه‌ی تغذیه کننده آب زیرزمینی و نیز افزایش پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری دانست. در سال‌های ۲۰۱۵–۲۰۰۳ میزان این افت بیشتر شده است و در سال‌های پایانی دوره موردمطالعه میزان افت شدیدتر شده است. این مهم نمایان‌گر آن است که یکی از دلایل افت سطح ایستابی می‌تواند بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باشد و نشان می‌دهد این میزان افت در قسمت‌های میانی دشت نیز رخ داده؛ اما آب سطحی توانسته تا حدی باعث جبران آن شود.

۳. تغییر کاربری اراضی

با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵ حاصل شد. نتایج تغییرات کاربری اراضی در سطح حوزه آبخیز بیستون در طی دوره موردمطالعه در شکل (۵) و جدول (۴) ارائه شد. دقت انجام طبقه‌بندی با استفاده از ضریب کاپا محاسبه گردید و در جدول (۳) آورده شده است.

جدول۳. ارزیابی صحت طبقه‌بندی برای نقشه کاربری‌ها استخراج شده در سال‌های موردبررسی

سال	ضریب کاپا	صحت کلی
۱۹۹۱	۸۶/۳۲	۸۹/۹۲
۲۰۰۳	۸۹/۲۶	۹۰/۲۰
۲۰۱۵	۸۹/۲۶	۹۰/۲۰



شکل۵. نقشه کاربری اراضی حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های موردمطالعه

جدول٤. مقایسه مساحت و درصد مساحت کاربری‌های مختلف منطقه در سال‌های موردبررسی

نام کاربری	مساحت ha (۱۹۹۱)	مساحت ha (۲۰۰۳)	مساحت ha (۲۰۱۵)
بایر و رخنمون سنگی	۴۰۲۳۷/۲۹	۲۶۰۰۵/۶۸	۴۲۲۲۹/۱۱
مرتع	۲۸۸۵۳/۲۸	۳۲۴۱۴/۹۴	۱۷۷۷۰/۶۵
کشاورزی	۱۶۸۱۶/۲۳	۲۷۰۷۰/۵۶	۲۴۷۲۰/۹۳
مسکونی	۵۵۵/۷۵	۷۴۹/۰۷	۱۱۷۰/۴۵
پهنه‌آبی	۱۰۶۳/۵۳	۸۸۶/۳۲	۸۶۱/۳۹
صنعت	۱۰۸/۰۹	۵۰۷/۶	۸۸۲/۶۳

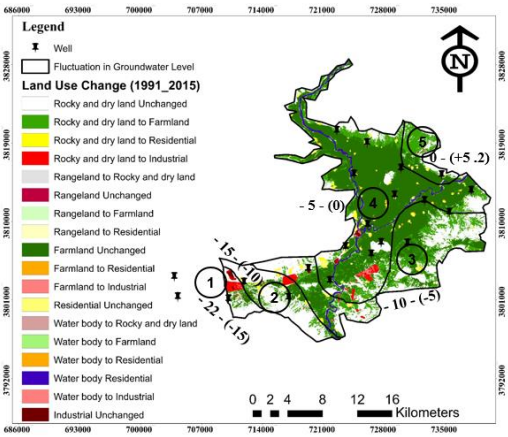
باتوجه‌به نتایج ارائه شده در جدول (۴) مشاهده می‌شود در دوره اول در سال ۱۹۹۰ اراضی بایر مساحتی حدود ۴۰۲۳۷/۲۹ هکتار از منطقه را در بر گرفته و در سال ۲۰۰۳ بیش از ۶۴ درصد آن در همان وضعیت باقیمانده است در این کاربری تغییرات چندان زیاد نیست. زیرا قسمتی از این طبقه که شامل رخنمون سنگی است در ارتفاعات قرار گرفته و در دسترس بشر قرار ندارد و غیر قابل تغییر به کاربری‌های دیگر است. این دوره همچنین با افزایش مساحت اراضی کشاورزی همراه بوده، از دلایل عمده این تغییر کاربری می‌توان به ایجاد طرح زهکشی اراضی و تجهیز و نوسازی شبکه‌های آبیاری در آن سال‌ها اشاره کرد که به‌علت مساعد شدن شرایط آب‌رسانی، توسط کشاورزان منطقه به زیر کشت رفتند. همین امر سبب گردید تا اراضی حاشیه‌ی رودخانه در اختیار کشاورزان قرار گرفته و حریم رودخانه مورد تصرف قرار گیرد. این دوره همچنین با رشد مناطق مسکونی که عمدتاً گسترش مناطق روستایی را شامل می‌شوند همراه بود.

مساحت مناطق صنعتی تقریباً ۴/۵ برابر شده است. از دلایل افزایش کاربری مرتع در پایان این دوره را می‌توان به افزایش بارندگی و ترسالی متوسط در سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۲ اشاره نمود. دوره دوم کاهش اراضی بایر، مرتع و افزایش اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعت صورت‌گرفته است. در این دوره ۴۷ درصد از اراضی مرتعی به بایر تبدیل شدند علت آن‌را می‌توان کاهش بارندگی و خشک‌سالی متوسط در سال ۸۷-۸۶ و خشک‌سالی شدید در سال ۹۴-۹۳ دانست. پس می‌توان نتیجه گرفت افزایش و کاهش بارندگی بیش از هر چیزی مراتع را تحت تأثیر قرار داده است. این دوره با افزایش مساحت مناطق مسکونی و همچنین احداث کارخانه‌ها و صنایع بزرگ همراه بوده است.

به‌طورکلی طی این دوره ۲۵ساله، وسعت اراضی کشاورزی ۱/۵ برابر، مناطق مسکونی شامل منازل روستایی و شهری دوبرابر و مساحت مناطق صنعتی حدوداً هشت برابر شده است.

۴. اثر کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی

با انطباق دو نقشه تغییرات کاربری اراضی و نقشه تغییرات کمی سطح آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای دوره موردمطالعه در محیط ArcGIS، نقشه‌ای حاصل شد که از پنج گروه تشکیل شده است و در شکل (۵) نشان داده شده است. سپس تغییرات کاربری اراضی به وجود آمده و میزان تغییرات کمی افت سطح ایستابی در هر یک از گروه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. این روش می‌تواند روش مناسبی برای مکان‌هایی که کاربری‌ها در هم ادغام شده‌اند باشد.



شکل۶. هم‌پوشانی میزان و نوع تغییرات کاربری و افت سطح ایستابی (۱۹۹۱-۲۰۱۵)

همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود تغییرات کاربری اراضی قابل ملاحظه‌ای در سطح آبخوان اتفاق افتاده است. برای بررسی جزئیات بیشتر، تغییرات کاربری هر گروه به‌صورت جداگانه بررسی شد.

نتایج حاصل از تلفیق نقشه تغییرات کاربری اراضی و نقشه افت سطح ایستابی در سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۹۱ نشان داد، در قسمت غربی دشت بیستون که بیشترین میزان افت ۲۲/۵ متر است تغییر از سایر کاربری‌ها به کاربری صنعت و سپس کشاورزی بالاترین میزان تغییرات کاربری اراضی را به خود اختصاص داده است. و با نزدیک شدن به سمت نواحی مرکزی و شرقی دشت، باتوجه‌به عبور رودخانه گاماسیاب در این قسمت، کاربری اصلی شامل کشاورزی بوده و در این منطقه کارخانجات بزرگی قرار گرفته‌اند و از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کنند. همچنین سطح ایستابی چاه‌هایی که در حاشیه رودخانه قرار گرفته‌اند نیز کاهش یافته است؛ بنابراین رشد صنعتی و توسعه کشاورزی از دلایل اصلی افت منابع آب زیرزمینی است (وانگ و همکاران[1] ۲۰۱۶). همچنین بهره‌برداری بی‌رویه از رودخانه و افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌تواند از دلایل اصلی افت سطح آب باشد. نتایج حاصل از تغییرات کمی سطح ایستابی نشان داد سطح آب زیرزمینی در منطقه‌ای که رودخانه وارد دشت می‌شود به دلیل ارتباط هیدرولیکی با رواناب سطحی در بالاترین سطح خود قرار دارد و به‌تدریج در داخل دشت به دلیل استفاده از آب سطحی به دنبال آن سطح آب زیرزمینی نیز کاهش‌یافته است. این نتایج با یافته‌های (سینک و کاسانا[2]، ۲۰۱۷).

۵. تحلیل آماری

به‌منظور مقایسه میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در دو سال ۱۹۹۱ و ۲۰۱۵، از آنالیز واریانس دوطرفه (GLM) استفاده شد. به همین منظور پیزومترهای موردمطالعه مطابق شکل (۵) در پنج گروه کاربری قرار گرفتند و اختلاف سطح ایستابی در گروه‌های مختلف و همچنین در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۵ مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر گروه، سال و اثر

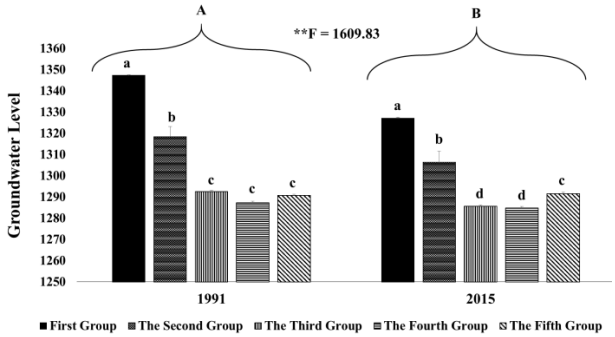
1. Wang et al
2. Singh & Kasana

متقابل سال و گروه بر ارتفاع سطح آب زیرزمینی معنی‌دار بوده است و در جدول (۵) نتایج ارائه شده است.

جدول۵. نتایج آزمون تحلیل واریانس دوطرفه (GLM)

	درجه آزادی	آماره‌ی F	سطح معنی‌داری
سال	۱	۱۶۰۹/۸۳	۰/۰۰
گروه	۴	۱۰۱/۷۹	۰/۰۰
سال × گروه	۴	۲۷۱/۸۴	۰/۰۰

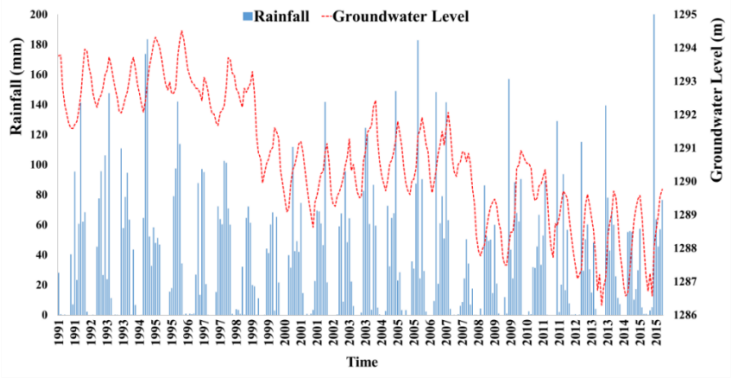
باتوجه‌به نتایج تحلیل واریانس دوطرفه، اثر سال و اثر متقابل گروه و سال معنی‌دار شد؛ بنابراین به‌منظور مقایسه میانگین‌ها از روش دانکن استفاده شد. باتوجه‌به نتایج آزمون دانکن در هر دو سال گروه‌ها بر میانگین سطح ایستابی اثر معنی‌داری داشتند. همچنین نتایج شکل (۷) حاکی از آن است که تراز سطح ایستابی در سال ۱۹۹۱ با میانگین ۱۲۹۵/۲۰ به‌طور معنی‌داری بیشتر از تراز سطح ایستابی در سال ۲۰۱۵ با میانگین ۱۲۸۹/۲۳ است.



شکل ۷. میانگین سطح ایستابی (± خطای استاندارد) در متغیرهای سال و گروه (حروف کوچک نشان‌دهنده معنی‌داری گروه‌ها در هر سال، حروف بزرگ نشان‌دهنده معنی‌داری بین دو سال، ** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ است)

۶. ارتباط آب زیرزمینی و بارندگی

تغییرات تراز آب زیرزمینی و بارندگی ماه‌های مختلف در دوره ۲۵ساله با استفاده از روش شبکه‌بندی تیسن تهیه گردید. نتایج بیانگر آن است که سطح تراز آب زیرزمینی در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۶ روند افزایشی اما شیب کند دارد و از سال ۱۹۹۶ به بعد روند کاهشی است. شیب این تغییرات در دهه ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ کم بوده؛ اما از سال ۲۰۰۶ این تغییرات تشدید می‌گردد و با یک شیب تند روند کاهشی ادامه می‌یابد و در پایان دوره آماری به کم‌ترین مقدار رسیده است. کمینه مطلق این تغییرات در دوره مربوط به سال ۲۰۱۳ است. مطابق شکل (۸) سطح تراز آب در منطقه موردمطالعه روند نزولی دارد و به‌طور متوسط در دوره زمانی موردمطالعه، افت تراز آب زیرزمینی حدود هفت متر است و آبخوان با کسری ذخیره سالانه مواجه بوده و بیلان کاملاً منفی است.



شکل ۸. آبنمود روند نوسانات بارندگی و تراز آب زیرزمینی (از فروردین تا اسفند هر سال) در سال‌های (۲۰۱۵-۱۹۹۱)

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود می‌توان گفت تقریباً روند کلی فراز و نشیب‌های دو منحنی بارندگی و تراز آبخوان دشت هم‌زمان و با تأخیر کمی اتفاق می‌افتد. تغییرات بارشی شدیدی در منطقه قابل‌تفکیک نیست اما روند کاهشی در سطح آب زیرزمینی بسیار مشخص است و این امر نشان‌دهنده بهره‌برداری بی‌رویه و بیش از حد از منابع آب زیرزمینی است که ناپایداری منابع آبی و توسعه کشاورزی را در پی داشته و بیلان منفی دشت موردمطالعه را بیانگر است. باتوجه‌به اینکه محور طولی نمودار ۱۲ماهه است مقدار تبعیت دو نمودار از یکدیگر مشهود نمی‌باشد، به همین منظور برای نمایش میزان اثرگذاری بارندگی بر تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری و نقش بارندگی در تغییرات عمق سطح ایستابی اقدام به تعیین ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های میانگین تغییرات سطح ایستابی با یک تا چهار ماه تأخیر در میانگین بارندگی ماهانه شد. نتایج حاصله در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ٦. ماتریس همبستگی بین متغیر بارندگی و تراز آب زیرزمینی ماهانه

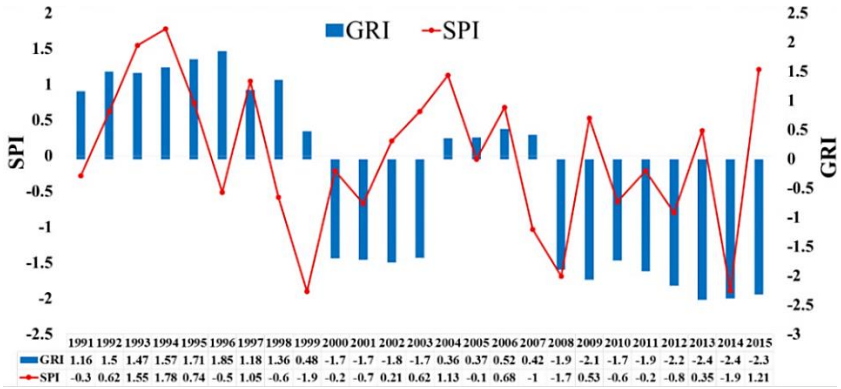
	هم‌زمان	تأخیر یک ماه	تأخیر دو ماه	تأخیر سه ماه	تأخیر چهار ماه
ضریب همبستگی پیرسون	۰/۱۴۴*	۰/۲۵۰**	۰/۲۸۴**	۰/۲۷۷**	۰/۲۲۱**
سطح معنی‌داری	۰/۰۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

* در سطح ۰/۵ درصد معنی‌دار است. ** در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار است.

نتایج آزمون پیرسون نشان می‌دهد بارندگی دو ماه قبل بالاترین همبستگی را با سطح آب زیرزمینی دارد. به عبارتی تغییرات بارشی تأثیرات خود را با تأخیر دوماهه بر تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

۷. شاخص‌های خشک‌سالی

در این تحقیق با استفاده از روش تیسن تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی و بارندگی در سطح منطقه محاسبه گردید. سپس به‌منظور بررسی خشک‌سالی هواشناسی از شاخص SPI و برای منابع آب زیرزمینی، شاخص GRI مورداستفاده قرار گرفت. نتایج حاصله در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل۹. انطباق شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه

شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در تمام سال‌ها دارای مقادیری نزدیک به نرمال و یا ترسالی است به جز سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۱، ۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۱۵-۲۰۱۴ که دارای خشک‌سالی متوسط تا شدید است. اما نتایج حاصل از شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) نشان داد در سال ۱۹۹۲-۱۹۹۱ تا سال ۲۰۰۰-۱۹۹۱ دارای مقادیر ترسالی متوسط تا شدید و از سال ۲۰۰۰-۱۹۹۱ تا سال ۲۰۰۴-۲۰۰۳ دارای خشک‌سالی شدید است. و از سال ۲۰۰۴-۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸-۲۰۰۷ دارای مقادیر نزدیک به نرمال است و بعداز آن تا سال ۲۰۱۶-۲۰۱۵ دارای خشک‌سالی شدید تا بسیار شدید است.

مشاهده می‌شود در هشت سال اول دوره موردمطالعه زمانی که SPI دارای مقادیر نزدیک به نرمال است، GRI دارای مقادیر ترسالی متوسط و شدید است. اما در هشت سال انتهایی باوجوداینکه SPI دارای مقادیر نزدیک به نرمال است شاخص خشک‌سالی آب زیرزمینی دارای خشک‌سالی شدید تا بسیار شدید است. به نظر می‌رسد هم‌زمان با وقوع خشک‌سالی‌ها، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری نیز افزایش پیدا کرده و سبب تشدید افت سطح ایستابی شده است. بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی میزان افت را تشدید نموده و موجب می‌شود تا در دوره ترسالی هم جبران نشود و سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه، روبه خشکی گرایش پیدا کند.

بحث

یکی از عوامل اصلی افت منابع آب زیرزمینی، بهره‌برداری غیراصولی از این منابع است. باتوجه‌به اینکه بین منابع آب سطحی و زیرزمینی یک ارتباط دوسویه وجود دارد و در تقابل با یکدیگر هستند، برداشت‌های بی‌رویه از این منابع برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب بدون شک در آینده بحران‌های زیادی را موجب خواهد افتاد. در این تحقیق تغییرات کاربری اراضی و نوسانات اقلیمی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل انسانی و محیطی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ارزیابی و سپس ارتباط این عوامل با سطح آب زیرزمینی دشت بیستون در یک دوره ۲۵ساله آماری بررسی شد. برای این منظور نقشه کاربری اراضی در سه دوره زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵، از تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست و با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال به دست آمد. آمار سطح ایستابی ۲۱ حلقه چاه پیزومتری، با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی (OK) با کمترین میزان RMSE و MBE استفاده شد.

نتیجه‌گیری

در شرایط فعلی بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، افت سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط برابر با ۶/۷۸ متر (۰/۶۷ متر در سال) در طول دوره موردمطالعه (۱۳۹۴-۱۳۷۰) است. کاهش سطح منابع آب منطقه را می‌توان علاوه بر عوامل انسانی و تغییرات

کاربری اراضی به کاهش بارندگی و خشک‌سالی‌های رخ داده در بازه‌های زمانی مختلف نسبت داد. شدت این افت در مناطق مختلف باتوجه‌به میزان تغذیه توسط آب رودخانه و تخلیه آبخوان توسط انواع بهره‌برداری‌ها، متفاوت است. افزایش سطح اراضی کشاورزی یکی از دلایل اصلی میزان افت منابع آب زیرزمینی منطقه است که با یافته‌های ژیوان و همکاران[1] (۲۰۰۲) همخوانی دارد. از سوی دیگر توسعه و تمرکز صنایع بزرگ که عمدتاً از نوع صنایع آب‌بر مانند شهرک صنعتی، کارخانه‌های تولیدی، مجتمع پتروشیمی و پلیمر و از همه مهم‌تر نیروگاه حرارتی است که در هر ساعت ۲۰۰۰ مترمکعب آب مصرف می‌کند و تمامی نیازهای آبی این صنایع، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. اگر روند فعلی ادامه یابد، در آینده نزدیک می‌تواند دشت را با معضلاتی همچون فرونشست سطح زمین، تخلیه هرچه بیشتر آب‌های زیرزمینی و در نتیجه افت بالاتر سطح ایستابی و به‌تبع آن کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی مواجه نماید. این نتایج با یافته‌های شیمیلیس و همکاران[2](۲۰۱۵) همسو است.

ارزیابی منابع آب زیرزمینی و همبستگی آن با نرخ تغییرات کاربری اراضی/ پوشش سرزمین برای درک صحیح مشکلات محیطی موجود در منطقه ضروری است (سینگ و همکاران[3]، ۲۰۱۰)، از این رو یافته‌های این تحقیق در درک مشکلات موجود در منطقه و شناسایی گزینه‌های مؤثر مدیریتی در منطقه موردمطالعه مفید است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

1. Xiuwan et al
2. Shimelis et al
3. Singh et al

منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد.، صفری، شیوا.، و ملانوری، الهام. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب. مجله جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۸(۸۹)، ۱۶-۱. https://geoplanning. abrizu.ac.ir/article_16478.html

امرایی، بهزاد. (۱۴۰۱). آشکارسازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر افت سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۲(۶۴)، ۳۰۵-۲۹۱. https://www.sid.ir/paper/965387/fa

آریاصدر، مریم.، رحیمی، داریوش.، امیری، هادی.، و زند، مهران. (۱۴۰۳). تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضهٔ آبخیز چم انجیر. *مجله برنامه ریزی فضایی*، ۱۴(۴)، ۸۰-۵۳. https://sppl.ui.ac.ir/article_28747.html

عمادالدین، سمیه.، و نظری‌گزیک، زهرا. (۱۴۰۳). برآورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخلسنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مشهد). مجله جغرافیا و توسعه، ۲۱(۷۳)، ۲۳۹-۲۲۱. https://gdij. sb.ac.ir/article_8029.html

نامی، محمد حسن.، و نادری، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی میزان فرونشست کلان‌شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخلسنجی پراکنشگر دائم و تصاویر راداری سنتینل-۱. *مجله دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۴(۲)، ۱۵۷-۱۳۸. http://dx.doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1

References

Ait M'Barek, S., Bouslihim, Y., Rochdi, A., Miftah, A., & Beroho, M. (2024). The combined impact of climate change scenarios and land use changes on water resources in a semi-arid watershed. *Scientific African*, 25, e02319. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02319

Amini, A., & Hesami, A. (2017). The role of land use change on the sustainability of groundwater resources in the eastern plains of Kurdistan, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 297-305. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6014-3

Ammeish, E. S., Mabrouk, B. M., & Morsy, W. S. (2016). RS and GIS based approach for detecting landuse changes and its impact on the groundwater aquifer. *Life Science Journal*, 13(4), 62-74. https://www.lifesciencesite.com

Amraei, B.(2022). Detection of the effect of climate change on the drainage of Aquifer of Birjand plain. *Journal of Geographical Sciences*, 23(64), 291-305. https://sid.ir/paper/965387/en (In Persian)

Arslan, H. (2014). Estimation of spatial distribution of groundwater level and risky areas of seawater intrusion on the coastal region in Çarşamba Plain, Turkey, using different interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(8), 5123-5134. https://doi.org/10.1007/s10661-014-3764-z

Aryasadr, M., Rahimi, D., Amiri, H., & Zand, M. (2024). Impact of Climate Change on Groundwater in Cham Anjir Aquifer. *Spatial Planning*, *14*(4), 53-80. https://doi.org/10.22108/sppl.2024.141550.1790 (In Persian)

Asghari, S. , Safari, S., & mollanouri, E. (2024). Investigating the height changes of the land surface using the SBAS radar interferometry technique in a part of Sarab county. *Journal of Geography and Planning*, *28*(89), 1-16. https://doi.org/ 10.22034/gp.2023.55307.3099 (In Persian)

Bamal, A., Uddin, M. G., & Olbert, A. I. (2024). Harnessing machine learning for assessing climate change influences on groundwater resources: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(17), e37073. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37073

Carmona, G., Varela-Ortega, C., & Bromley, J. (2013). Supporting decision making under uncertainty: Development of a participatory integrated model for water management in the middle Guadiana river basin. *Environmental Modelling & Software*, 50, 144-157. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.007

Cemek, B., Güler, M., Kılıc, K., Demir, Y., & Arslan, H. (2007). Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 124(1-3), 223-234. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9220-y

Christakos, G. (2000). Modern spatiotemporal geostatistics. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. https://books.google.com/books/about/Modern_Spatiotemporal_Geostatistics.html?id=dNXnCwAAQBAJ

Cochand, F., Brunner, P., Hunkeler, D., Rössler, O., & Holzkämper, A. (2021). Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 798, 148759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148759

Dams, J., Woldeamlak, S. T., & Batelaan, O. (2008). Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(6), 1369-1385. https://doi.org/10.5194/hess-12-1369-2008

Delbari, M., Motlagh, M. B., Kiani, M., & Amiri, M. (2013). Investigating spatio-temporal variability of groundwater quality parameters using geostatistics and GIS. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 4(12), 3623-3632.

https://scholar.google.com/scholar?hl=fa&as_sdt=0%2C5&q=Investigating+spatio-temporal+variability+of+groundwater+quality+parameters+using+geostatistics+and+GIS.

Deng, L., & Shangguan, Z. P. (2016). Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation & Development*, 27(2), 144-156. https://doi.org/10.1002/ldr.2537

Emadodin, S., & Nazari gazik, Z. (2023). Estimation of Subsidence Rate and Groundwater Level Changes in Mashhad Plain. *Geography and Development*, *21*(73), 221-239. https://doi.org/ 10.22111/gdij.2023.8029 (In Persian)

Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Groundwater*, 50(1), 19-26. https://doi.org/ 10.1111/j.1745-6584.2011.00825.x

Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-9780195115383?cc=ir&lang=en&

Hejazian, M., Gurdak, J. J., Swarzenski, P., Odigie, K. O., & Storlazzi, C. D. (2017). Land-use change and managed aquifer recharge effects on the hydrogeochemistry of two contrasting atoll island aquifers, Roi-Namur Island, Republic of the Marshall Islands. *Applied Geochemistry*, 80, 58-71. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.006

Indhanu, N., Chalermyanont, T., & Chub-Uppakarn, T. (2025). Spatial assessment of land use and land cover change impacts on groundwater recharge and groundwater level: A case study of the Hat Yai basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102097. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102097

Issaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. https://www.amazon.com/Introduction-Applied-Geostatistics-Edward-Isaaks/dp/0195050134

Kambhammettu, B. V. N. P., Allena, P., & King, J. P. (2011). Application and evaluation of universal kriging for optimal contouring of groundwater levels. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 413-422. https://doi.org/10.1007/s12040-011-0075-4

Keeler, B. L., & Polasky, S. (2014). Land-use change and costs to rural households: A case study in groundwater nitrate contamination. *Environmental Research Letters*, 9(7), 074002. https://ioppublishing.org/contacts/

Kumar, S., & Sondhi, S. K. (2005). Network design for groundwater level monitoring in upper Bari Doab canal tract, Punjab, India. *Irrigation and Drainage*, 54(4), 431-442. https://doi.org/10.1002/ird.194

Kuroda, K., Hayashi, T., Do, A. T., Canh, V. D., Nga, T. T. V., Funabiki, A., & Takizawa, S. (2017). Groundwater recharge in suburban areas of Hanoi, Vietnam: Effect of decreasing surface-water bodies and land-use change. *Hydrogeology Journal*, 25(3), 727-742. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1528-2

Lee, J. Y., Yi, M. J., Moon, S. H., Cho, M., Won, J. H., Ahn, K. H., & Lee, J. M. (2007). Causes of the changes in groundwater level at Daegu, Korea: The effect of subway excavations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(3), 251-258. https://doi.org/10.1007/s10064-006-0074-x

Liu, X., Wang, Y., & Zhang, H. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 35-42. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.007

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-184. https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2099290

Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005

Mishra, N., & Kumar, S. (2015). Impact of land use change on groundwater recharge in Haridwar District. *20th International Conference on Hydraulics*, Water Resources and River Engineering, IIT Roorkee, India. https://www.researchgate.net/publication/289538156_Impact_Of_Land_Use_Change_on_Groundwater_Recharge_in_Haridwar_District

Mohammdy, M., Moradi, H. R., Zeinivand, H., & Temme, A. J. A. M. (2015). A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1515-1526. https://doi.org/10.1007/s13762-014-0728-3

Moradi, H. R., Rajabi, M., & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*, 84(1-2), 35-46. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.016

Nami, M. H, & Naderi, M. (2024). Assessments of Land Subsidence in the Tehran Metropolitan Using Satellite Radar Interferometry Technique. *Disaster Prev. Manag. Know*,14 (2),138-157. http://dpmk.ir/article-1-695-fa.html (In Persian)

Narany, T. S., Aris, A. Z., Sefie, A., & Keesstra, S. (2017). Detecting and predicting the impact of land use changes on groundwater quality, a case study in Northern Kelantan, Malaysia. *Science of the Total Environment*, 599-600, 844-853. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.171

Omran, E. S. E. (2012). A proposed model to assess and map irrigation water well suitability using geospatial analysis. *Water*, 4(3), 545-567. https://doi.org/10.3390/w4030545

Owuor, S. O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A. C., Rufino, M. C., Pelster, D. E., Díaz-Pinés, E., & Breuer, L. (2016). Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 5(1), 16. https://doi.org/10.1186/s13717-016-0060-6

Reghunath, R., Sreedhara Murthy, T. R., & Raghavan, B. R. (2005). Time series analysis to monitor and assess water resources: A moving average approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 109(1-3), 65-72. https://doi.org/10.1007/s10661-005-5838-4

Richards, J. A., & Jia, X. (2005). Remote sensing digital image analysis. *Springer Publications*, New York City, United States. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29711-1

Sajjad, M. M., Wang, J., Abbas, H., Ullah, I., Khan, R., & Ali, F. (2022). Impact of climate and land-use change on groundwater resources, study of Faisalabad district, Pakistan. *Atmosphere*, 13(7), 1097. https://doi.org/10.3390/atmos13071097

Schiedek, T., Beier, M., & Ebhardt, G. (2008). Monitoring urban impact on groundwater quality: Statistical analyses in Darmstadt, Germany. Geophysical Research Abstracts, 10, EGU2008-A-10275. https://doi.org/10.13140/2.1.1169.3449

Shimelis, B. G., Alamirew, T., Merkel, B. J., & Melesse, A. M. (2015). Land use and land cover change impact on groundwater recharge: The case of Haramaya Lake Watershed, Ethiopia. In Landscape dynamics, soils and hydrological processes in varied climates, 93-111, *Springer Publications*, New York City, United States. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18787-7_6

Shirmohammadi, B., Moradi, H. R., Moosavi, V., Taie Semiromi, M., & Zeinali, A. (2013). Forecasting of meteorological drought using Wavelet-ANFIS hybrid model for different time steps (Case study: Southeastern part of east Azerbaijan province, Iran). *Natural Hazards*, 69(1), 386-402. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0716-9

Singh, O., & Kasana, A. (2017). GIS-based spatial and temporal investigation of groundwater level fluctuations under rice-wheat ecosystem over Haryana. *Journal of the Geological Society of India*, 89(5), 554-562. https://doi.org/10.1007/s12594-017-0644-5

Singh, S., Singh, C., & Mukherjee, S. (2010). Impact of land-use and land-cover change on groundwater quality in the Lower Shiwalik hills: A remote sensing and GIS based approach. *Open Geosciences*, 2(2), 124-131. https://doi.org/10.2478/v10085-010-0003-x

Wang, J., Gao, Y., & Wang, S. (2015). Land use/cover change impacts on water table change over 25 years in a desert-oasis transition zone of the Heihe River Basin, China. *Water*, 8(1), 11. https://doi.org/10.3390/w8010011

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. *UNESCO*, Paris, France. https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2015

Xiao, D. N., Li, X. Y., Song, D. M., & Yang, G. J. (2006). Spatial-temporal dynamics simulation of groundwater mining in Minqin Oasis. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(6), 567-578. https://doi.org/10.1007/s11430-007-2001-9

Xiuwan, C. (2002). Using remote sensing and GIS to analyze land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1), 107-124. https://doi.org/10.1080/01431160010007051

Zhou, Z., Zhang, G., Yan, M., & Wang, J. (2012). Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(6), 3697-3710. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2217-1