

نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۳۹ شماره ۳

سال ۱۴۰۴

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی ۱۰۱

عنوان مقالات

- توسعه سامانه برخط یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل با تلفیق مدل‌های عددی آب و هوایی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی: مطالعه موردی حوزه آبریز گرگانرود ۲۲۱
زهره‌اغلزاده - محمد شاه‌سوندی - محمدرضا مسعودی مقدم - سمیه طالی - جعفر یزدی
- پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و ارزیابی دقت آن‌ها ۲۴۵
امید رحمتی - سید مسعود سلیمان‌پور - صمد شادفر - صلاح‌الدین زاهدی
- مطالعه جریان آب و انتقال نیترات تحت روش آبیاری ستیریوت با استفاده از مدل HYDRUS-3D ۲۶۱
سمانه اطمینان - وحیدرضا جلالی
- ارزیابی اثرات مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر پویایی سفر و ویژگی‌های شیمیایی خاک ۲۷۷
افسانه بروور - ناصر برومند - مجید حجازی مهریزی - محمد سادات حسینی
- نقشه‌برداری زمانی مکانی کربن آلی خاک با استفاده از رویکرد مدلسازی معکوس: مطالعه موردی حوزه آبخیز زاینده‌رود استان اصفهان ۲۹۳
شیمیا معصومی - حمیدرضا متین‌فر - سید روح‌اله موسوی
- تحلیل روند تغییرات دمايي و بارشی و تأثیر آن بر آستانه‌های زایشی و رویشی و محدوده کشت گیاه عناب ۳۱۵
مهدی اسدی

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی-پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 39 شماره 3 مرداد-شهریور سال 1404

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه تبریز)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

آبیاری ومهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمالی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده کشاورزی - ص.پ. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

مقاله‌های این شماره در سایت <https://jsw.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شی شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 221 توسعه سامانه برخط یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل با تلفیق مدل‌های عددی آب و هوایی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی: مطالعه موردی حوضه آبریز گرگانرود
زهرا علیزاده - محمد شاه‌سوندی - محمدرضا مسعودی-مقدم - سمیه طالبی - جعفر یزدی
- 245 پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی در حوضه آبخیز تلوار استان کردستان با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و ارزیابی دقت آن‌ها
امید رحمتی - سید مسعود سلیمان‌پور - صمد شادفر - صلاح‌الدین زاهدی
- 261 مطالعه جریان آب و انتقال نیترات تحت روش آبیاری سنتریپوت با استفاده از مدل HYDRUS-3D
سمانه اطمینان - وحیدرضا جلالی
- 277 ارزیابی اثرات مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر پویایی سفر و ویژگی‌های شیمیایی خاک
افسانه برور - ناصر برومند - مجید حجازی مهریزی - محمد سادات حسینی
- 293 نقشه‌برداری زمانی مکانی کربن آلی خاک با استفاده از رویکرد مدلسازی معکوس: مطالعه موردی حوضه آبخیز زاینده‌رود استان اصفهان
شیما معصومی - حمیدرضا متین‌فر - سید روح‌اله موسوی
- 315 تحلیل روند تغییرات دمایی و بارشی و تأثیر آن بر آستانه‌های زایشی و رویشی و محدوده کشت گیاه عناب
مهدی اسدی

Development of an Integrated Online System for Flood Forecasting and Warning by Integrating Numerical Weather, Hydrological, and Hydraulic Models: A Case Study of the Gorganrood Watershed

Z. Alizadeh¹, M. Shahsavandi¹, M. Masoudi-Moghaddam¹, S. Talebi², J. Yazdi^{1*}

1- Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: j_yazdi@sbu.ac.ir)

2- GIS and Remote Sensing Department, Space Research Center, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Received: 12 June 2025

Revised: 20 July 2025

Accepted: 29 July 2025

Available Online: 29 July 2025

How to cite this article:

Alizadeh, Z., Shahsavandi, M., Masoudi-Moghaddam, M., Talebi, S., & Yazdi, J. (2025). Development of an integrated online system for flood forecasting and warning by integrating numerical weather, hydrological, and hydraulic models: A case study of the Gorganrood watershed. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 219-242. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93995.1485>

Introduction

Floods rank among the most devastating natural disasters, causing significant loss of life and property each year. Floods are among the most destructive natural disasters, causing extensive loss of life and property annually. The Gorganrood watershed in northeastern Iran is particularly vulnerable to frequent and severe flooding due to its unique geographical and climatic characteristics. Factors contributing to this high flood risk include steep topographical gradients, impermeable soil, and degraded vegetation cover, which lead to rapid and devastating flash floods. The region has experienced a rise in both the frequency and intensity of floods in recent years, resulting in significant damages, such as the catastrophic flood of March 2019. Consequently, the development of effective flood forecasting and early warning systems (FFEWS) has become a critical priority for crisis management. Recent advancements in numerical modeling offer powerful tools for more accurate and timely flood prediction. Weather Research and Forecasting (WRF) models are widely used for their precision in simulating regional precipitation. Hydrological models like the Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) are essential for converting predicted rainfall into surface runoff, while hydraulic models such as HEC-RAS excel at simulating river flow and mapping inundation zones. This research aims to develop and evaluate a sophisticated, integrated online system specifically for the Gorganrood watershed. The primary innovation of this study is the creation of a unified online platform that couples the WRF, HEC-HMS, and a 2D HEC-RAS model to forecast flood inundation up to 48 hours in advance. A further novelty lies in its software architecture, which utilizes React for the front-end and a Python-based Django framework for the back-end, a combination not previously applied in similar research for real-time visualization of flood forecasts.

Materials and Methods

The research focused on the Gorganrood watershed, a major basin in northeastern Iran covering approximately 11,380 km². The system developed was an integrated Web-GIS software platform designed for end-to-end flood forecasting. The system's workflow began with the automated retrieval of meteorological data from the Global Forecast System (GFS). This data served as input for the regional WRF model to generate high-resolution precipitation forecasts. The rainfall predictions were then fed into a calibrated HEC-HMS model to simulate the rainfall-runoff process and generate flood hydrographs. In the final stage, a 2D HEC-RAS hydraulic model was executed for critical, populated river reaches to produce detailed flood inundation maps. The technological



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93995.1485>

framework was built on modern software tools. The user interface (Front-End) was developed using React to create a dynamic user experience. The server-side logic (Back-End) was implemented in Python using the Django web framework. For data management, a PostgreSQL database with the PostGIS spatial extension was employed. GeoServer was used as the map server. The chosen models include:

- **WRF Model:** Selected for precipitation forecasting due to its open-source nature, flexibility, and widespread use.
- **HEC-HMS Model:** Chosen as the rainfall-runoff model for its suitability in a large basin with limited data. It was configured using the SCS-CN method for loss calculations, the SCS unit hydrograph method for runoff transformation, and the Muskingum method for channel routing.
- **HEC-RAS Model:** The 2D version was selected for hydraulic modeling due to its ability to simulate complex, two-dimensional flow dynamics when floods overtop riverbanks and its free availability.

Results and Discussion

The performance of each model component was rigorously evaluated. The WRF model was assessed using five historical storm events, comparing forecasts across five different lead times (6, 12, 18, 24, and 48 hours). Statistical analysis revealed that the 6-hour forecast horizon provided the optimal balance of accuracy and lead time, exhibiting the best performance metrics ($R^2=0.69$, $RMSE=12.25$, $NSE=0.0$). Thus, a 6-hour lead time was adopted for the operational system. The HEC-HMS model was calibrated and validated against observed data from several hydrometric stations (Nodeh, Arazkuseh, etc.). The results demonstrated a good agreement between the simulated and observed hydrographs, particularly in capturing the peak discharge and timing of floods. Observed discrepancies in total flood volume were attributed to uncertainties in spatial rainfall data and potential measurement errors. For the numerous sub-basins lacking gauging stations, model parameters were regionalized using a clustering technique based on physiographic similarity to the calibrated sub-basins. The integrated online system allows users to run the entire forecast chain through a web interface. To manage the significant computational requirements, the 2D HEC-RAS model was implemented for two high-priority areas: the region downstream of the Golestan Dam and the flood-prone city of Aq-Qala. A key challenge was the high computational demand of the models, which was addressed by leveraging the High-Performance Computing (HPC) cluster at Shahid Beheshti University. Another challenge is the potential for model instability and limitations imposed by data quality, which can be mitigated by more detailed calibration.

Conclusion

This research successfully developed a comprehensive, integrated online system for flood forecasting in the Gorganrood watershed by coupling the WRF, HEC-HMS, and HEC-RAS models. The evaluation showed that the WRF model provided acceptable precipitation forecasts, the HEC-HMS model accurately simulated rainfall-runoff processes, and the 2D HEC-RAS model produced valuable, high-resolution flood inundation maps. The system's robust software architecture, utilizing React, Python/Django, and PostgreSQL/PostGIS, provides an efficient, scalable, and user-friendly platform for operational flood management. This work demonstrates that the integration of advanced numerical models into a single, automated platform is a highly effective approach to mitigating flood risk. The resulting system offers a powerful tool for crisis managers and serves as a replicable model for developing similar advanced warning systems in other flood-prone basins.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the use of the High-Performance Computing (HPC) system at Shahid Beheshti University for the execution of the numerical models in this research.

Keywords: Django, Flood forecasting, Gorganrood watershed, HEC-HMS, HEC-RAS (2D), Integrated system, React, WRF

توسعه سامانه برخط یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل با تلفیق مدل‌های عددی آب و هوایی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی: مطالعه موردی حوضه آبریز گرگانرود

زهرا علیزاده^۱ - محمد شاه‌سوندی^۱ - محمدرضا مسعودی‌مقدم^۱ - سمیه طالبی^۲ - جعفر یزدی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

چکیده

سیلاب به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی به جوامع وارد می‌کند. در این پژوهش، یک سامانه‌ی نرم‌افزاری یکپارچه Web-GIS برای پیش‌بینی و هشدار سیل طراحی و توسعه داده شده است. در این سامانه، از بستر نرم‌افزاری محبوب React برای توسعه رابط کاربری (GUI) بهره گرفته شده است. برنامه‌نویسی سمت سرور در زبان Python و کتابخانه تحت وب آن Django انجام شده و در همین بخش، پایگاه اطلاعاتی PostgreSQL و افزونه مکانی آن PostGIS برای ذخیره‌سازی اطلاعات استفاده شده است. سرویس‌دهنده نقشه نیز در این سامانه نرم‌افزار GeoServer انتخاب شده است. سامانه یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سیل، با استفاده از تلفیق مدل پیش‌بینی بارش WRF، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و همچنین مدل هیدرولیکی HEC-RAS (2D)، به پیش‌بینی سیلاب و پهنه‌بندی آن می‌پردازد. این سامانه برای حوضه آبریز سیل‌خیز گرگانرود پیاده‌سازی شده است. حوضه آبریز گرگانرود، به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، در معرض سیلاب‌های مکرر و گسترده قرار دارد. مدل پیش‌بینی بارش WRF برای تخمین بارش با افق زمانی پیش‌بینی ۶ ساعت تا ۴۸ ساعت آینده آماده‌سازی شده است و به منظور بهبود دقت پیش‌بینی‌ها، پارامترهای نرم‌افزارها واسنجی و تحلیل حساسیت شده‌اند. این پژوهش با ترکیب مدل‌های پیشرفته، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داده و ابزار مؤثری برای مدیریت بهتر سیلاب‌ها فراهم می‌آورد. این سامانه با فراهم آوردن افق پیش‌بینی ۴۸ ساعته برای وقوع سیل و همچنین غلبه بر چالش‌های محاسباتی از طریق به‌کارگیری زیرساخت پردازش قوی (HPC) و مدل‌سازی متمرکز بر نواحی کلیدی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملیاتی برای مدیریت بحران در مناطق سیل‌خیز عمل نماید.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی سیل، React، Django، WRF، HEC-HMS، HEC-RAS(2D)

مقدمه

و مناطق کوهستانی، سیلاب‌ها به‌دلیل ترکیب بارش‌های شدید و شیب‌های تند زمین، به سرعت به جریان‌های تند و مخرب تبدیل می‌شوند (Avand, Moradi, & Ramazanzadeh Lasboyee, 2021). با توجه به این واقعیت، توسعه سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل که بتوانند وقوع سیلاب را پیش‌بینی و هشدارهای لازم را به موقع ارائه دهند، به یکی از اولویت‌های مدیریت بحران در کشورهای سیل‌خیز تبدیل شده است.

سیلاب به‌عنوان یکی از شدیدترین و پرتکرارترین بلایای طبیعی، تأثیرات مخربی بر جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط زیست دارد. این پدیده طبیعی به‌دلیل تغییرات اقلیمی، افزایش وقوع بارش‌های شدید و فعالیت‌های انسانی نظیر تخریب پوشش گیاهی و توسعه غیراصولی مناطق شهری، بیش از پیش در بسیاری از نقاط جهان رایج شده است (Mishra et al., 2022). به‌ویژه در کشورهایی با توپوگرافی پیچیده

۱- گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- بخش جی‌آی‌اس و سنجش از دور - مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران

(*) - نویسنده مسئول: (Email: j_yazdi@sbu.ac.ir)

نشان دادند که ترکیب مدل‌های هیدرولوژیکی با داده‌های محلی می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشد و زمان واکنش به سیلاب‌ها را افزایش دهد.

جعفرزادگان و همکاران (Jafarzadegan et al., 2023) در پژوهش خود به بررسی تأثیر پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش بر مدیریت سیلاب در شهرهای ساحلی پرداختند و بیان کردند که استفاده از مدل‌های پیشرفته نظیر SWMM و HEC-RAS می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌های شهری کمک شایانی کند. رن و همکاران (Ren & Cao, 2023) نیز در مطالعه‌ای مشابه، به بررسی قابلیت‌های مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مناطق سیل‌خیز پرداختند و دقت بالای این مدل را در پیش‌بینی رواناب سیلاب تأیید کردند.

از سوی دیگر، چیونگ و همکاران (Cheong et al., 2023) به بررسی چالش‌های عملیاتی سامانه‌های هشدار سیل در کره جنوبی پرداختند و تأکید کردند که استفاده از فناوری‌های نوین و داده‌های واقعی می‌تواند کارایی این سامانه‌ها را بهبود بخشد. در مطالعه‌ای دیگر، مرشد و همکاران (Morshed, Mushwani, Sahak, & Hairan, 2024) به تحلیل سامانه هشدار سیل در پاکستان پرداختند و نقش مدل‌های عددی پیش‌بینی هواشناسی در کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب‌ها را مورد بررسی قرار دادند.

مطالعه چن و همکاران (Chen et al., 2022) نیز نشان داد که استفاده از مدل‌های ترکیبی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی می‌تواند به بهبود دقت در پیش‌بینی مناطق سیل‌گیر کمک کند. این پژوهش تأکید دارد که مدل‌هایی مانند HEC-RAS که قابلیت شبیه‌سازی دو بعدی جریان را دارند، می‌توانند اطلاعات ارزشمندی درباره توزیع عمق و سرعت جریان در سیلاب‌های گسترده ارائه دهند.

مونزو و همکاران (Muñoz, Orellana-Alvear, Bendix, Feyen, & Céleri, 2021) در مطالعه خود به توسعه سامانه‌های هشدار سیل بر اساس داده‌های محلی و شرایط اقلیمی پرداختند و اهمیت به‌کارگیری داده‌های منطقه‌ای در افزایش دقت پیش‌بینی‌ها را برجسته کردند. ناندا و همکاران (Nanda et al., 2016) نیز در پژوهشی مشابه، به تحلیل سامانه‌های هشدار سیل در چین پرداختند و نشان دادند که استفاده از داده‌های محلی و تحلیل‌های حساسیت می‌تواند دقت مدل‌ها را بهبود بخشد.

همچنین، پاتل و همکاران (Patel et al., 2022) در مطالعه‌ای بر روی حوضه‌های آبریز هیمالیا، به بررسی دقت مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش در مناطق کوهستانی پرداختند و کارایی بالای مدل WRF را در این مناطق تأیید کردند. زانگ و همکاران (Zang, Meng, Guan, Lv, & Yan, 2022) نیز به بررسی چالش‌های عملیاتی سامانه‌های هشدار سیل در مناطق شهری چین پرداختند و بر ضرورت توسعه سامانه‌های پیش‌بینی بر اساس داده‌های واقعی تأکید کردند.

در دهه اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در مدل‌های عددی هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حاصل شده که امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و سریع‌تر سیلاب‌ها را فراهم کرده است. مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی مانند WRF (Weather Research and Forecasting)، به دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای و جهانی، به یکی از پرکاربردترین ابزارها در زمینه پیش‌بینی سیلاب تبدیل شده‌اند (Liu, Wang, & Lei, 2021). این مدل‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی، توانایی پیش‌بینی بارش‌های شدید را تا ۴۸ ساعت قبل از وقوع فراهم می‌آورند که این ویژگی برای کاهش خسارات ناشی از سیلاب بسیار حیاتی است (Nanda, Sahoo, Beria, & Chatterjee, 2016).

مدل‌های هیدرولوژیکی مانند HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) و SWMM (Storm Water Management Model) نیز در شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای بارش-رواناب و تبدیل بارش‌های پیش‌بینی شده به جریان‌های سطحی کاربرد فراوانی دارند (Kalimisetty, Singh, Korada Hari Venkata, & Mahamood, 2022). از سوی دیگر، مدل‌های هیدرولیکی مانند Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) با قابلیت شبیه‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای و پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر، نقش مهمی در تعیین نقاط پرخطر و طراحی سامانه‌های هشدار سریع ایفا می‌کنند (Shaikh et al., 2023).

حوضه آبریز گرگانرود به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی خاص خود، یکی از مناطق سیل‌خیز کشور ایران محسوب می‌شود. این حوضه، با داشتن شیب‌های تند، زمین‌های نفوذناپذیر و پوشش گیاهی تخریب‌شده، در معرض سیلاب‌های ناگهانی و ویرانگر قرار دارد (Karami, Abedi Koupai, & Gohari, 2024). بر اساس آمار، این منطقه در سال‌های اخیر با افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها مواجه بوده که خسارات مالی و جانی زیادی را به دنبال داشته است (Ghahraman, Nagy, & Nooshin Nokhandan, 2023). این‌رو، تحقیق حاضر بر آن است تا با استفاده از ترکیب مدل‌های عددی WRF، HEC-HMS، HEC-RAS و SWMM، سامانه‌ای یکپارچه برای پیش‌بینی و هشدار سیلاب در این منطقه طراحی و توسعه دهد. مطالعات بسیاری در زمینه توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های هشدار سیل انجام شده است که نشان‌دهنده اهمیت و کارایی این سامانه‌ها در کاهش ریسک سیلاب‌ها است. برای مثال، در مطالعه‌ای که توسط مرینو و همکاران (Merino, García-Ortega, Navarro, Sánchez, & Tapiador, 2022) انجام شد، تأثیر مدل‌های WRF بر پیش‌بینی بارش‌های شدید در منطقه‌ای کوهستانی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این مدل‌ها توانایی بالایی در پیش‌بینی دقیق زمان و شدت بارش‌ها دارند. همچنین، باجرچاریا و همکاران (Bajracharya et al., 2021) با بررسی سامانه هشدار سیلاب در نپال

و تحلیل‌های زمانی هستند، می‌تواند به بهبود مدیریت بحران‌های سیلابی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای منجر شود. این سامانه‌ها با ارائه هشدارهای زودهنگام و دقیق به مسئولان و ساکنان مناطق آسیب‌پذیر، نقش مهمی در کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و مدیریت بهتر منابع آب ایفا می‌کنند.

هدف اصلی این پژوهش توسعه و ارزیابی یک سامانه پیشرفته برای پیش‌بینی و هشدار سیل در حوضه آبریز گرگانود است. با توجه به شرایط خاص جغرافیایی، توپوگرافی کوهستانی و میزان بالای تخریب پوشش گیاهی در این منطقه، گرگانود به یکی از سیل‌خیزترین حوضه‌های کشور تبدیل شده است. سیلاب‌های مخرب در این حوضه، به دلیل ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی، خسارات جانی و مالی سنگینی را به همراه داشته‌اند.

با در نظر گرفتن این چالش‌ها، تحقیق حاضر بر آن است تا با تحلیل دقیق عوامل سیل‌خیزی و استفاده از مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، سامانه‌ای را توسعه دهد که بتواند به‌طور دقیق و به‌موقع وقوع سیلاب‌ها را پیش‌بینی کند و هشدارهای لازم را به مسئولان و ساکنان منطقه ارائه دهد. این سامانه به نحوی طراحی شده است که قابلیت اجرا در شرایط خاص منطقه را داشته باشد و بتواند با سرعت و دقت بالا، داده‌های مورد نیاز را جمع‌آوری و پردازش کند.

نوآوری اصلی این پژوهش، طراحی و توسعه یک سامانه نرم‌افزاری یکپارچه آنلاین (Web-GIS) است که زنجیره کامل مدل‌های پیش‌بینی هواشناسی (WRF)، هیدرولوژی (HEC-HMS) و هیدرولیک دوبعدی (HEC-RAS) را به‌صورت خودکار به یکدیگر متصل می‌کند. توسعه نرم‌افزاری آنلاین که با تلفیق مدل پیش‌بینی بارش WRF، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS قادر است ۴۸ ساعت قبل از وقوع سیل، وضعیت رواناب و پهنه سیلاب را پیش‌بینی کند، از جمله دستاوردهای این تحقیق به شمار می‌رود و در سطح ملی سابقه نداشته است. همچنین، پیاده‌سازی سامانه هشدار سیل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی React در بخش Front-End و Django در بخش Back-End، یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش از جنبه برنامه‌نویسی است. تلفیق این دو زبان برای نمایش و اعلام زمان واقعی نتایج پیش‌بینی سیلاب، موضوعی است که تاکنون در پژوهش‌های مشابه مورد استفاده قرار نگرفته است. در همین بخش، پایگاه اطلاعاتی PostgreSQL و افزونه مکانی آن PostGIS برای ذخیره‌سازی اطلاعات به کار گرفته شده است. سرویس‌دهنده نقشه در این سامانه نیز نرم‌افزار GeoServer انتخاب شده است (GeoServer Project, 2024). این سامانه نه تنها از لحاظ تکنیکی پیشرفته است، بلکه با توجه به شرایط اقتصادی و زیرساختی منطقه مورد مطالعه، هزینه‌های اجرایی و نگهداری را به حداقل رسانده و با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، عملکرد و کارایی بالایی ارائه می‌دهد. این پژوهش گامی مؤثر در بهبود مدیریت ریسک

یکی از سامانه‌های پیشرفته در این حوزه که توسط ناندا و همکاران (Nanda et al., 2016) توسعه یافته، به بررسی استفاده از مدل‌های دینامیکی و داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی سیلاب در مناطق روستایی پرداخته است. در این سامانه، مدل WRF برای پیش‌بینی بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی رواناب به کار رفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در کنار داده‌های زمینی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک شایانی کند.

لی و همکاران (Liu et al., 2021) در پژوهشی دیگر، یک سامانه پیش‌بینی سیلاب بر اساس داده‌های هواشناسی و داده‌های راداری توسعه داده‌اند. این سامانه از ترکیب مدل‌های پیش‌بینی بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی برای ارائه هشدارهای سریع استفاده می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های راداری و باران‌سنج‌های خودکار می‌تواند دقت و سرعت سامانه‌های هشدار سیلاب را افزایش دهد.

کالیمستی و همکاران (Kalimisetty et al., 2022) در مطالعه‌ای، به طراحی سامانه‌های هشدار سیلاب در مناطق شهری پرداخته است. این سامانه از مدل‌های هیدرولیکی دوبعدی و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بارش استفاده می‌کند تا وضعیت سطح آب در شبکه‌های جمع‌آوری سیلاب و رودخانه‌های شهری را در زمان واقعی شبیه‌سازی کند. این سامانه برای مناطق شهری که به دلیل توسعه زیرساخت‌های غیراصولی در معرض خطر سیلاب هستند، بسیار مفید بوده و به کاهش ریسک خسارات جانی و مالی کمک می‌کند.

در پژوهشی دیگر، فلک و همکاران (Falck, Tomasella, & Papa, 2021) به بررسی یک سامانه هشدار سیلاب در آمریکای جنوبی پرداخته است. این سامانه با استفاده از مدل‌های عددی منطقه‌ای و داده‌های محلی، قادر به پیش‌بینی دقیق وقوع سیلاب در مناطق آسیب‌پذیر و اعلام هشدارهای زودهنگام به ساکنان است. این پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری مدل‌های ترکیبی و تحلیل داده‌های بلندمدت محلی می‌تواند به بهبود دقت سامانه‌های پیش‌بینی کمک کند.

بیاروهانگا و همکاران (Byaruhanga, Kibirige, Gokool, & Mkhonta, 2024) نیز در بررسی سامانه‌های هشدار سیل در مناطق حاره‌ای، بر اهمیت دقت و سرعت در پردازش داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تأکید کرده‌اند. این سامانه‌ها با استفاده از داده‌های دما و رطوبت نسبی، قادر به پیش‌بینی سیلاب‌های ناگهانی و ارائه هشدارهای ضروری هستند. به عقیده این پژوهشگران، ادغام داده‌های سطحی با داده‌های ارتفاعی و ترکیب آن‌ها با مدل‌های هیدرولیکی دو بعدی، می‌تواند نتایج دقیق‌تری را برای پیش‌بینی سیلاب فراهم کند. در مجموع، تحقیقات اخیر حاکی از آن است که توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب که مبتنی بر مدل‌های پیشرفته عددی، داده‌های محلی

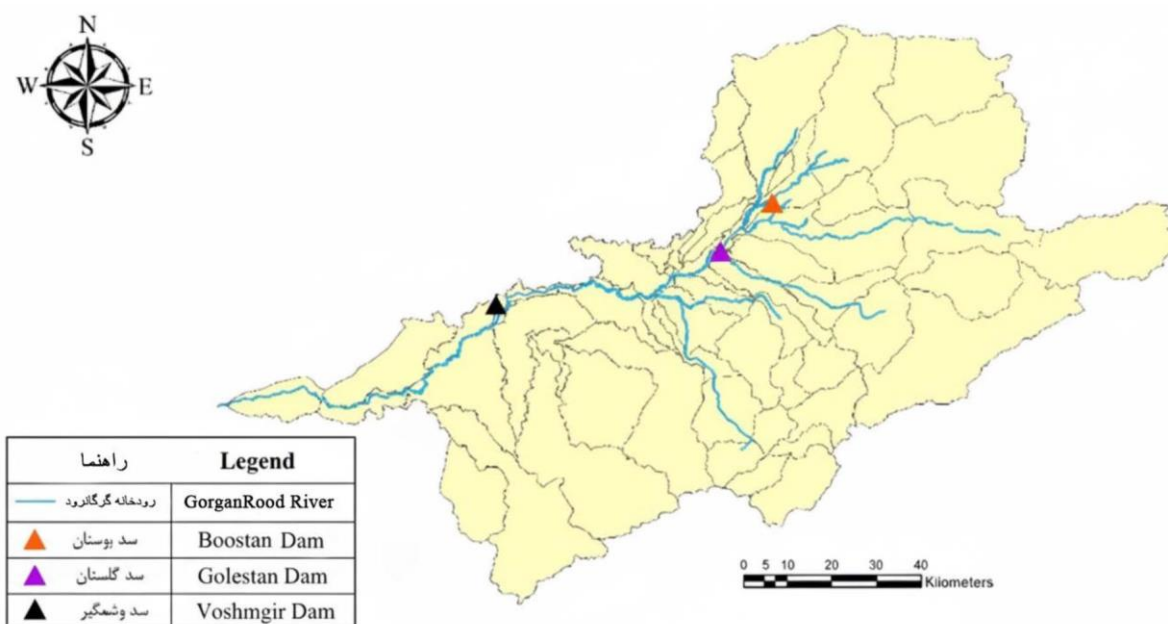
سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن در یکی از مناطق پرخطر کشور خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گرگانرود یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران است که در شمال شرقی کشور واقع شده و مساحتی بالغ بر ۱۱۳۸۰ کیلومتر مربع دارد که معادل ۴۸ درصد سطح استان گلستان است. این حوضه در شرق از کوه‌های واقع در استان خراسان شمالی آغاز شده و در غرب در مجاورت حوضه آبریز رود قره‌سو به دریای خزر ختم می‌شود. سیلاب‌های این منطقه به‌ویژه در مناطق پایین‌دست، نظیر شهر آق‌قلا و گمیشان، خسارات زیادی به زیرساخت‌ها و ساکنان وارد می‌کنند. بعنوان نمونه می‌توان به خسارات سنگین سیلاب فروردین‌ماه ۱۳۹۸ اشاره کرد. به‌دلیل وقوع سیلاب‌های مکرر، مدیریت این پدیده در حوضه آبریز گرگانرود از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل می‌تواند نقشی حیاتی در کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیلاب‌ها ایفا کند. در شکل ۱ محدوده جغرافیایی این حوضه آبریز به‌وضوح نمایش داده شده است.

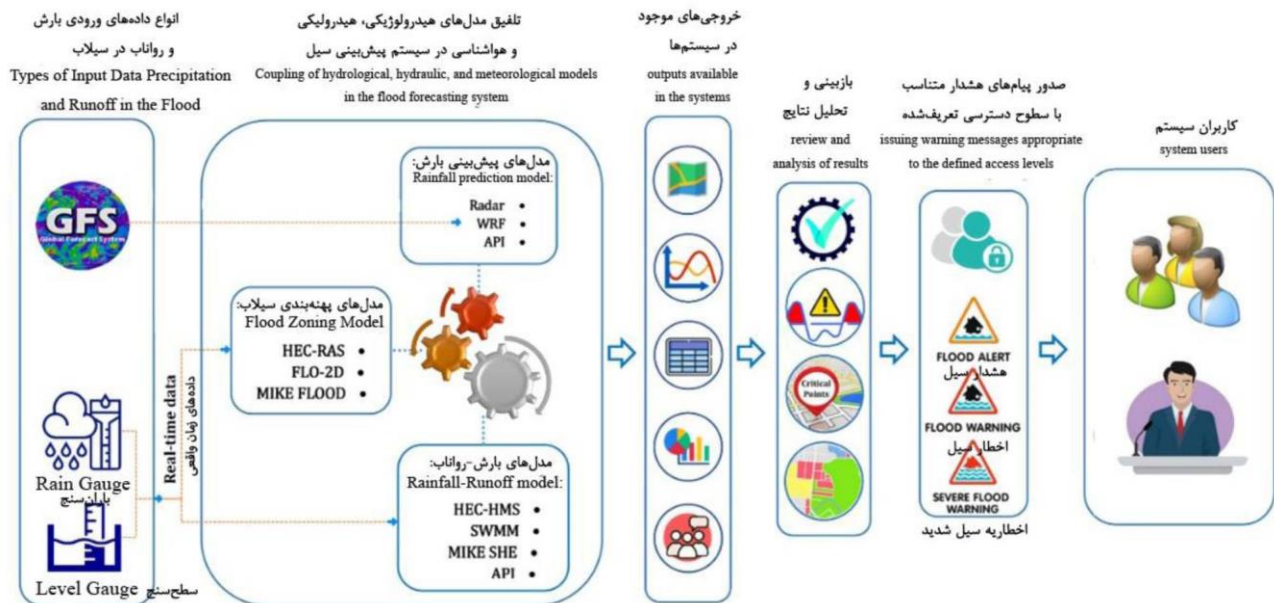
مدل مفهومی سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز گرگانرود به همراه شبکه آبراهه‌های اصلی و سدهای حوضه

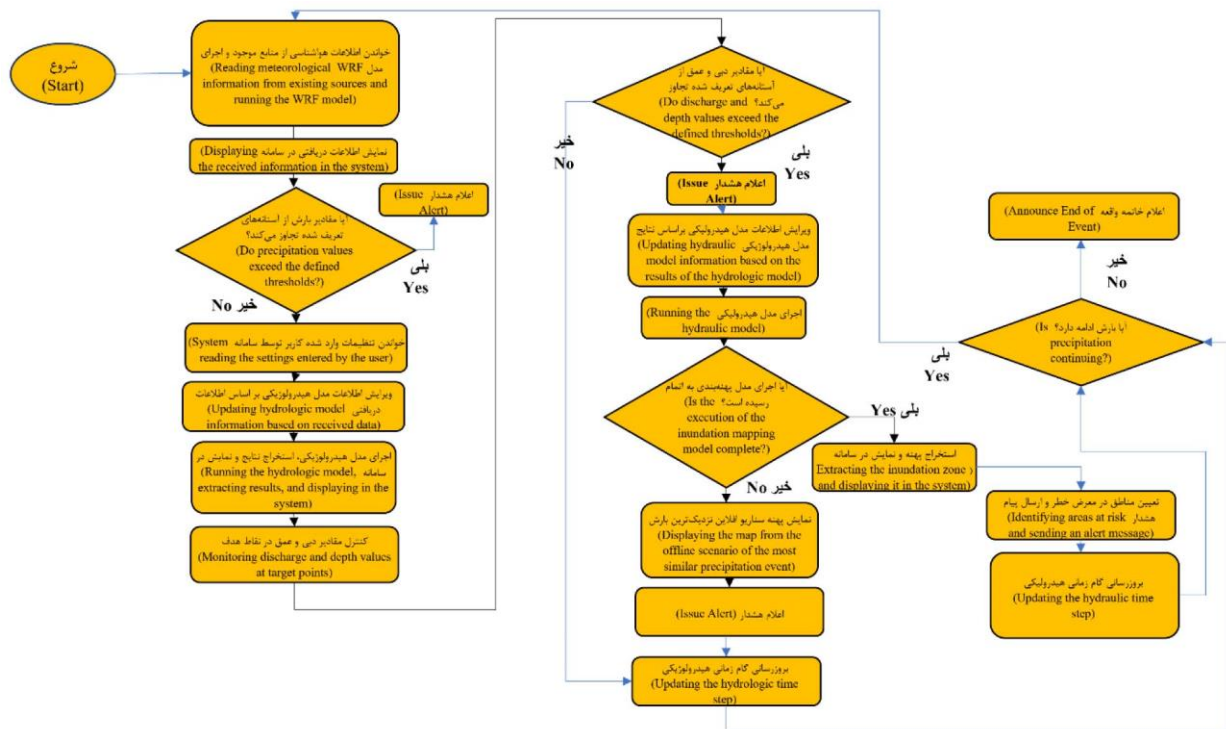
Figure 1- Map of the Gorganrroud watershed, along with the main drainage network and the dams in the basin.

آبریز گرگانرود در شکل ۲ نشان داده شده است. روند کار سامانه به این صورت است که داده‌های متغیرهای هواشناسی از مدل جهانی GFS (Global Forecast System) از منابع آنلاین بصورت بهنگام و البته اتوماتیک دریافت شده (NCEP, 2020) و بر اساس آنها مدل منطقه‌ای پیش‌بینی بارش WRF اجرا می‌شود. در ادامه، داده‌های پیش‌بینی شده بارش بر روی مدل هیدرولوژیکی اعمال شده و هیدروگراف سیل ورودی به رودخانه‌های حوضه محاسبه می‌شود. پس از این مرحله، امکان اجرای مدل هیدرولوژیکی بر اساس نتایج مدل هیدرولوژیکی وجود دارد. با توجه به زمانبر بودن اجرای مدل هیدرولوژیکی برای کل حوضه و از طرفی، اهمیت هشدار سریع سیل در شرایط بحرانی، برای هر یک از بازه‌های رودخانه که در HEC-RAS مدل‌سازی شدند، شرایط مرزی لازم از خروجی‌های مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استخراج گردید. به این ترتیب که هیدروگراف سیلاب محاسبه شده توسط HEC-HMS در ابتدای هر بازه به‌عنوان شرط مرزی بالادست (جریان ورودی) تعریف شد و برای شرط مرزی پایین‌دست نیز از فرض عمق نرمال بر اساس شیب بستر استفاده گردید. به‌طور خلاصه مراحل تشریح شده در فوق در فلوچارت شکل ۳ ارائه شده است. در ادامه توضیح اجزای این سامانه ارائه شده است.



شکل ۲- مدل مفهومی سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه آبریز گرگانرود

Figure 2- Conceptual model of the flood forecasting and warning software system for the Gorganroud watershed



شکل ۳- فلوچارت مراحل کار سامانه نرم‌افزاری پیش‌بینی و هشدار سیل حوضه آبریز گرگانرود

Figure 3- Process flowchart of the flood forecasting and warning software system for the Gorganroud watershed

بالاتری امکان‌پذیر است. اما از سوی دیگر، نزدیک شدن به مراحل پایانی شکل‌گیری سیلاب با کاهش زمان پیش‌هشدار همراه است و ممکن است زمان کافی برای عکس‌العمل در برابر سیل باقی نماند. به

مدل پیش‌بینی بارش

پیش‌بینی سیلاب در مراحل پایانی توسعه‌اش یعنی هنگامی که داده‌های بارش مشاهداتی بیشتری در دسترس قرار می‌گیرند، با دقت

برای پیش‌بینی سیل است. از بین مدل‌های هیدرولوژیکی نیز مدل‌های^۱ توده‌ای (یکپارچه) با توجه به ساده‌سازی‌های زیاد، قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای بارش-رواناب را با جزئیات زمانی و مکانی لازم برای حوضه آبریز گسترده گرگانرود ندارند. مدل‌های توزیعی فیزیک‌پایه نیز از طرف دیگر نیازمند حجم زیادی از اطلاعات مانند توزیع مکانی بارش و رطوبت خاک و دیگر متغیرها هستند که با توجه به محدودیت این داده‌ها، استفاده و بکارگیری آنها جدای از بار محاسباتی سنگین آنها، عملیاتی نیست. با توجه به جمع این موارد و با عنایت به سطح اطلاعات موجود حوضه آبریز گرگانرود، به نظر می‌رسد مدل‌های بارش-رواناب^۲ مفهومی گزینه مناسبی برای تبدیل بارش‌های پیش‌بینی شده (توسط مدل پیش‌بینی بارش) به مقادیر متناظر رواناب سیلاب در سطح حوضه باشد.

با توجه به ویژگی‌های بررسی شده برای مدل‌های پرکاربرد سیل مشخص است که مدل HEC-HMS گزینه‌ای مناسب برای مدل‌سازی بارش-رواناب مربوط به وقایع سیلابی به شمار می‌رود و مدل علاوه بر محبوبیت و گستردگی کاربرد در مدل‌سازی سیلاب، کاربردوست بوده و دسترسی رایگان به این مدل نیز وجود دارد. لذا در این پژوهش، مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز گرگانرود انتخاب شده است (USACE-HEC, 2018).

مدلسازی بارش-رواناب در مدل هیدرولوژیکی-HEC-HMS

زیربخش‌های اصلی مدل‌سازی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز بصورت زیر است:

الف- زیربخش منطقه‌ای کردن بارش

در این مرحله، بارش پیش‌بینی شده توسط مدل WRF که در سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل بصورت خودکار به فرمت رستر تبدیل می‌شود، در سطح هر زیرحوضه میانگین‌گیری شده و به آن زیرحوضه تخصیص داده می‌شود. مساحت سلول‌های محاسباتی بارش در مدل WRF، حدود 9Km^2 است.

ب- زیربخش محاسبه تلفات بارش

در این بخش، محاسبه میزان بارش مؤثر که پس از تلفات اولیه به رواناب تبدیل می‌شود، انجام می‌گیرد. برای این منظور، از روش-SCS (منحنی شماره سازمان حفاظت خاک آمریکا) استفاده می‌شود. این روش به دلیل سادگی و دقت قابل قبول در محاسبه تلفات بارش در مقیاس حوضه‌های بزرگ و به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود، انتخاب شده است.

منظور فراهم آوردن زمان پیش‌هشدار کافی، اغلب لازم است که افق پیش‌بینی‌ها را تا اندازه‌ای طولانی‌تر کرد که البته باعث کاهش دقت پیش‌بینی‌ها نیز خواهد شد. وجود زمان پیش‌هشدار کافی برای کارایی مطلوب سامانه هشدار سیل و عکس‌العمل در برابر سیل، بسیار حائز اهمیت است. در حال حاضر، تنها ابزاری که می‌تواند چنین مدت پیش‌هشدار را برای مدیران و مسئولان مدیریت بحران فراهم نماید، مدل‌های عددی آب و هوایی است. مدل‌های عددی آب و هوایی بسیاری در مراکز تحقیقاتی دنیا توسعه یافته‌اند که از مهمترین آنها می‌توان به مدل‌های GEM، ICON، ECMWF، GFS، MM5 و WRF اشاره کرد.

انتخاب مدل پیش‌بینی بارش در این پژوهش با یک رویکرد عملیاتی و با معیار اصلی هم‌راستایی با زیرساخت‌های ملی صورت گرفت. از آنجا که مدل WRF ابزار استاندارد و عملیاتی مورد استفاده در سازمان هواشناسی کشور است، این مدل به‌منظور اطمینان از قابلیت یکپارچه‌سازی سامانه حاضر با سیستم‌های ملی مدیریت بحران انتخاب شد. ویژگی‌های فنی مطلوب این مدل، مانند کدباز بودن و انعطاف‌پذیری بالا، از دیگر دلایل این انتخاب بود.

مدل بارش-رواناب

انتخاب مدل مناسب و برپایی مدل

با توجه به اهمیت پیش‌بینی محدوده مناطق سیل‌گیر، دبی و عمق آب برای مشخص نمودن مناطق اعلام هشدار و اعلام خطر به مناطق تحت تأثیر و با عنایت به تعدد رودخانه‌ها و (زیر)حوضه‌های مستقل حوضه‌های آبریز گرگانرود و از طرفی پراکنش کانون‌های جمعیتی و زیرساخت‌های در معرض آسیب، وجود مؤلفه مدل پیش‌بینی سیل برای این حوضه(ها) ضروری است. استفاده از مدل‌های رگرسیونی و داده‌مبنای گرچه روشی سریع برای این منظور است، اما سطح دقت لازم را با توجه به کیفیت سری داده‌های تاریخی موجود بخصوص برای حوضه‌ای مانند حوضه گرگانرودرود با ویژگی‌های فیزیوگرافی خاص دارا نیستند. همچنین مدل‌های رگرسیونی و داده‌مبنای پارامترهای فیزیکی مثل زبری بستر رودخانه‌ها را نیز توضیح نمی‌دهند. دامنه عملکرد مطلوب این روش‌ها محدود به بازه داده‌های تاریخی ثبت شده‌ای است که در حین آموزش این مدل‌ها و تنظیم پارامترهای آنها بدست آمده است و اگر سیلابی با ابعاد مکانی و زمانی متفاوت با آنچه در سری‌های تاریخی مورد استفاده در فرآیند آموزش این مدل‌ها در حوضه اتفاق بیفتد، از مطلوبیت دقت نتایج این روش‌ها کاسته می‌شود. بهمین دلیل در خیلی از سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل از این نوع مدل‌ها بعنوان مدل اصلی پیش‌بینی سیلاب استفاده نمی‌شود. لذا استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای پیش‌بینی سیلاب گزینه مناسبتری

در این بخش با توجه به نیازها، امکانات و محدودیت‌های موجود و قابلیت‌ها و نقاط ضعف مدل‌های مذکور در بند قبلی، مدل هیدرولیکی مناسب و منتخب برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌های حوضه معرفی می‌شود.

با توجه به اینکه محدوده مدلسازی در این پروژه محدوده وسیعی از رودخانه‌های حوضه آبریز گرگانرود را پوشش می‌دهد، در بخش‌هایی از جریان عبوری از رودخانه‌ها در محدوده مورد بررسی (مثلاً زمانی که جریان از کانال اصلی خارج می‌شود) ماهیت جریان دوبعدی است. اکثر مدل‌های دوبعدی تجاری هستند و دسترسی رایگان به آنها وجود ندارد. از طرفی با توجه به قابلیت‌های مدل‌ها از جمله کاربرپسند بودن آنها، به نظر می‌رسد که مدل رایگان HEC-RAS که قابلیت شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی سیلاب را نیز داراست، گزینه مناسبی بعنوان مدل هیدرولیک و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه گرگانرود باشد (Brunner, 1995). مدل تجاری MIKEFLOOD نیز با توجه به اینکه دسترسی به آن در ایران وجود دارد می‌تواند مطرح باشد (DHI, 2017)؛ اما در این سامانه، مدل HEC-RAS بعنوان انتخاب اول مورد توجه قرار گرفته است.

مدل HEC-RAS

مدل HEC-RAS، توسعه‌یافته توسط ارتش مهندسی آمریکا، به عنوان یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین ابزارها در زمینه مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها و کانال‌ها شناخته می‌شود. این مدل با قابلیت شبیه‌سازی دقیق جریان‌های یک‌بعدی و دوبعدی، به‌صورت دائمی و غیردائمی، امکان تحلیل دقیق پدیده‌های هیدرولیکی مختلف از جمله سیلاب، فرسایش و رسوب‌گذاری را فراهم می‌آورد.

یکی از ویژگی‌های کلیدی مدل HEC-RAS انعطاف‌پذیری در تعریف شبکه است. مدل HEC-RAS محدودیتی در اندازه و شکل المان‌های شبکه ندارد و این امر باعث افزایش دقت و کاهش زمان محاسبات می‌شود. همچنین این مدل قادر است معادلات حاکم بر جریان را هم در حالت انتشار^۲ و هم در حالت موج دینامیکی کامل^۳ حل کند که این ویژگی آن را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مناسب می‌سازد. از طرفی وجود یک رابط کاربری گرافیکی ساده و شهودی، استفاده از این نرم‌افزار را برای کاربران با سطوح مختلف تخصص آسان و امکان ارتباط مستقیم با نرم‌افزارهای GIS مانند ArcGIS، فرآیند آماده‌سازی داده‌ها و نمایش نتایج را به شدت تسهیل کرده است. این مدل با بسط معادلات یک‌بعدی سنت و نانت به فضای دو بعدی، قادر به تحلیل دقیق‌تر رفتار هیدرولیکی جریان در محیط‌های پیچیده رودخانه‌ای است. در واقع، مدل HEC-RAS با حل عددی معادلات

در این روش، ابتدا تلفات اولیه (مانند تبخیر و جذب اولیه) محاسبه می‌شود و سپس بارش باقی‌مانده که به‌عنوان بارش مؤثر تلقی می‌شود، وارد فرآیند شبیه‌سازی رواناب می‌گردد. پارامتر مهم در این روش، عدد منحنی (CN) است که بر اساس نوع خاک، پوشش گیاهی و وضعیت رطوبت اولیه منطقه تعیین می‌شود. استفاده از روش SCS-CN به‌دلیل سازگاری با شرایط متنوع حوضه‌ها و امکان بکارگیری در شبیه‌سازی‌های مختلف بارش - رواناب رایج است (SCS, 1972; SCS, 1986).

ج- زیربخش محاسبه هیدروگراف رواناب زیرحوضه‌ها

در این بخش، رواناب سطحی تولید شده در هر زیرحوضه محاسبه و به‌صورت هیدروگراف رواناب نمایش داده می‌شود. برای این منظور از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده می‌شود که یکی از روش‌های پرکاربرد و ساده برای تبدیل بارش به رواناب است. این روش به‌دلیل سادگی و پارامترهای محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد و امکان شبیه‌سازی هیدروگراف‌های رواناب با دقت قابل قبول را فراهم می‌سازد. روش هیدروگراف واحد SCS به‌دلیل تطبیق‌پذیری با شرایط مختلف و قابلیت شبیه‌سازی رواناب در بازه‌های زمانی کوتاه، به‌ویژه در حوضه‌های با دبی بالا و شرایط پیچیده، انتخاب شده است. استفاده از این روش کمک می‌کند تا تغییرات دبی و زمان تأخیر رواناب به‌دقت مشخص شود (SCS, 1972; SCS, 1986).

د- زیربخش روندیابی در رودخانه‌ها

در این بخش، رواناب‌های تولیدشده از زیرحوضه‌ها در طول رودخانه‌های حوضه جاری می‌شوند و برای شبیه‌سازی این روند از مدل‌های روندیابی جریان استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش ماسکینگام به‌عنوان یکی از روش‌های رایج روندیابی هیدرولوژیکی استفاده شده است.

روش ماسکینگام به‌دلیل سادگی و نیاز به داده‌های محدود، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز بزرگ که دسترسی به داده‌های دقیق جریان محدود است، انتخاب می‌شود. دلیل این امر آن است که روش ماسکینگام به جای نیاز به داده‌های دقیق هندسی مقاطع عرضی رودخانه، تنها به دو پارامتر هیدرولوژیکی (X و K) وابسته است که رفتار کلی بازه رودخانه را شبیه‌سازی می‌کنند. این روش به شبیه‌سازی حرکت رواناب در طول رودخانه‌ها کمک می‌کند و با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، جریان ورودی به نقاط مختلف رودخانه را محاسبه می‌کند.

مدل هیدرولیکی و پهنه‌بندی سیلاب

انتخاب مدل مناسب و برپایی مدل هیدرولیکی رودخانه‌ها

مونتهگومری و همکاران (Montgomery, Buffington, Smith, 1995) بهره گرفته شد (شکل ۴). در این روش، شیب به عنوان یک شاخص کلیدی (پراکسی) برای تعیین مورفولوژی کانال و زبری هیدرولیکی متناسب با آن عمل می کند. در نهایت، این لایه های زبری تفکیک شده برای رودخانه ها و سیلاب دشت ها از طریق گزینه RAS Mapper به مدل دوبعدی معرفی شدند. شکل ۵ و شکل ۶ ضریب مانینگ در محدوده شهر آق قلا و بعد از سد گلستان را نشان می دهد.

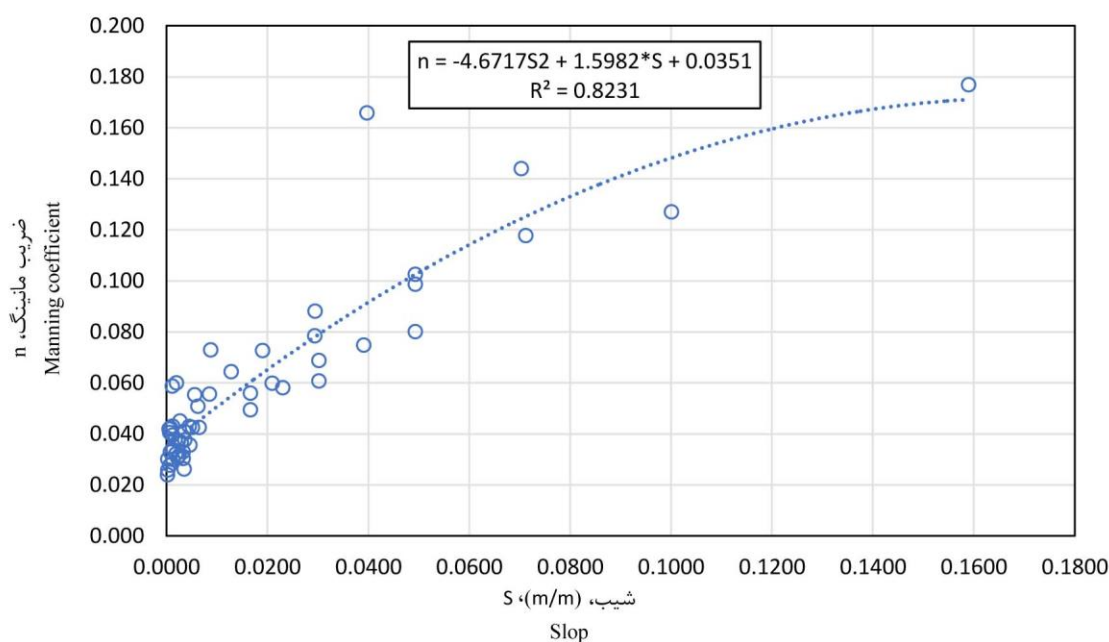
زبان برنامه نویسی

انتخاب زبان ها و نرم افزارهای مناسب برای توسعه سامانه در سمت کاربر و سمت سرور در عملکرد سامانه بسیار تأثیرگذار است. در ادامه توضیح ابزارهای مورد استفاده در قسمت های Front-End، Back-End و پایگاه داده ارائه شده است:

حاکم بر جریان در دو جهت فضایی، تغییرات سطح آب، سرعت جریان و سایر پارامترهای هیدرولیکی را در طول زمان و مکان پیش بینی می کند. با توجه به قابلیت های مدل در شبیه سازی جریان در محیط های دوبعدی، امکان در نظر گرفتن هندسه پیچیده رودخانه ها، تغییرات ناگهانی در عرض و عمق کانال، و همچنین تأثیر سازه های هیدرولیکی بر جریان به صورت دقیق تر فراهم می شود (Brunner, 1995). مراحل اصلی مدل سازی هیدرولیکی رودخانه ها با استفاده از نرم افزار HEC-RAS شامل وارد کردن داده های DEM، تعریف محدوده دوبعدی جریان، مش بندی محدوده، تعریف مرزهای ورودی و خروجی جریان، و تعیین شرایط مرزی مانند دبی، سطح آب یا شیب سطح آب است.

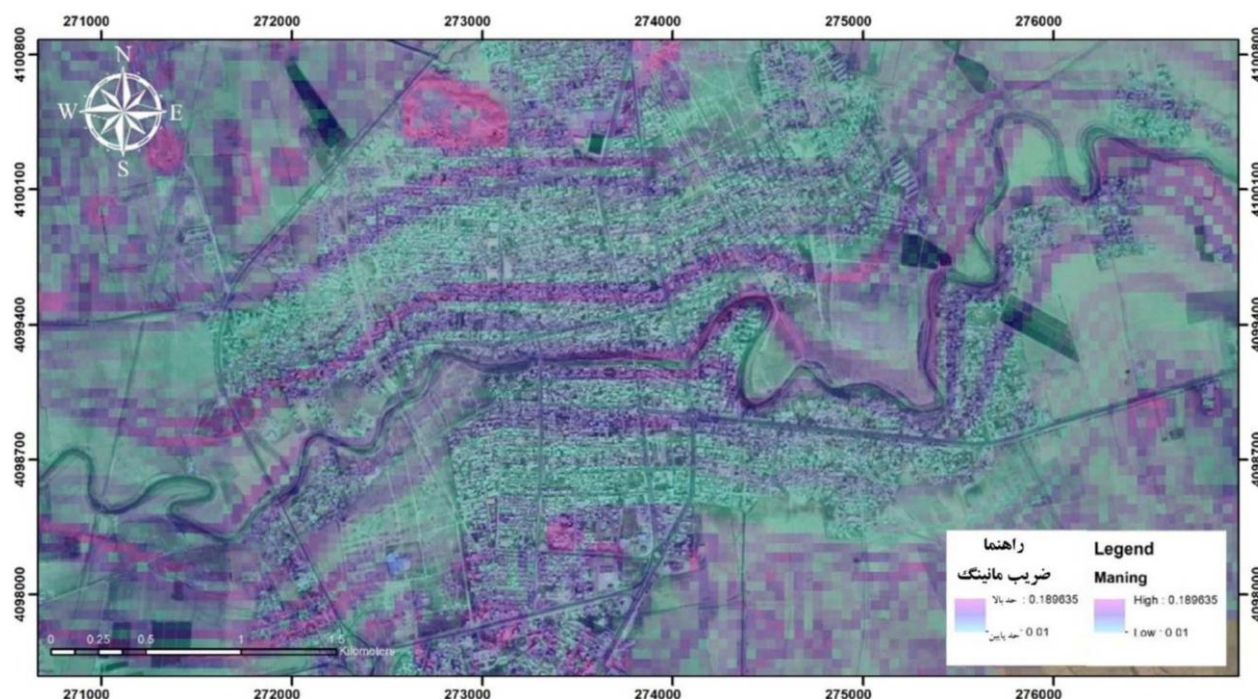
رویکرد تعیین ضریب زبری مانینگ به صورت تفکیک شده انتخاب گردید. برای مناطق شهری مانند آق قلا، با توجه به غلبه تأثیر کاربری اراضی، از یک نقشه زبری مجزا مبتنی بر نوع پوشش سطح استفاده شد (شکل ۵).

در مقابل، برای بازه های طبیعی رودخانه، از چارچوب معتبر

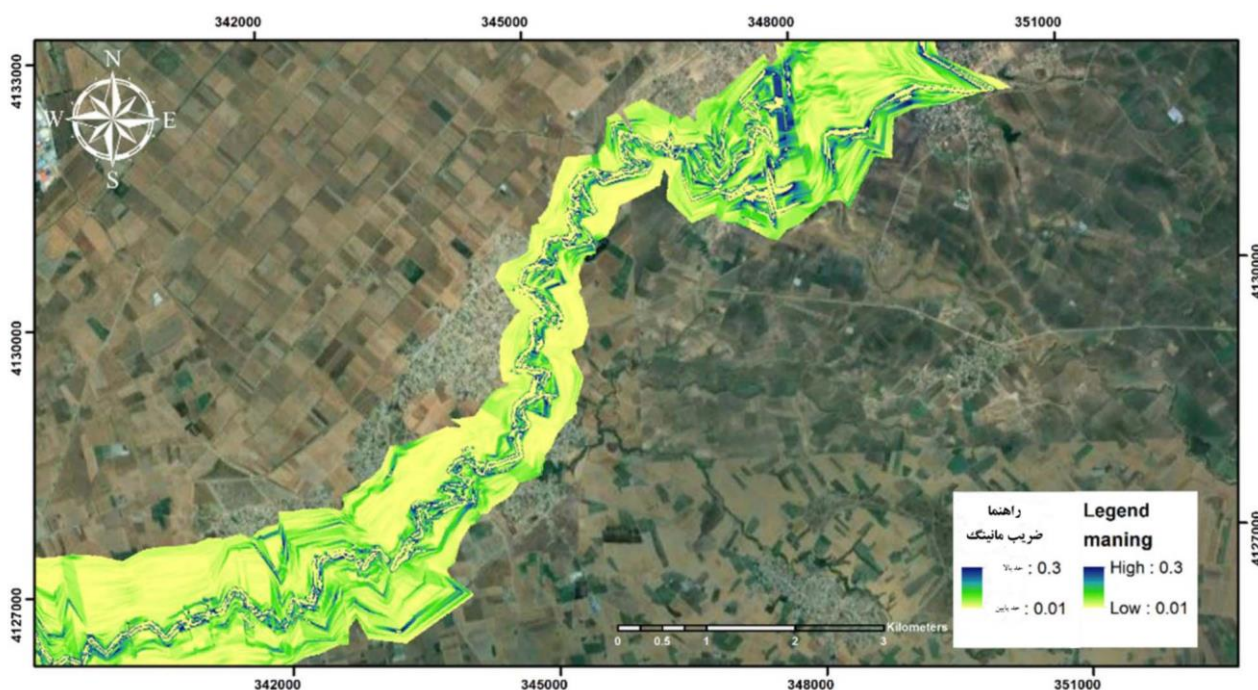


شکل ۴- رابطه شیب رودخانه با ضریب مانینگ آن (Montgomery et al., 1995)

Figure 4- The relationship between river slope and its Manning's coefficient (Montgomery et al., 1995)



شکل ۵- نقشه ضریب مانینگ سطوح شهری در محدوده شهر آق قلا
Figure 5- Map of Manning's coefficient for urban surfaces within the city of Aqqala



شکل ۶- نقشه ضریب مانینگ محدوده رودخانه بعد از سد گلستان
Figure 6- Map of Manning's coefficient for the river reach downstream of the Golestan Dam

کتابخانه به توسعه‌دهندگان امکان می‌دهد تا رابط‌های کاربری پویا و تعاملی ایجاد کنند که بتواند اطلاعات حساس مانند تغییرات سطح آب، پیش‌بینی‌ها و هشدارها را به سرعت به‌روزرسانی کند. با بهره‌گیری از

• **Front-End**
برای توسعه رابط کاربری سامانه، از کتابخانه React، یک کتابخانه محبوب جاوا اسکریپت (JavaScript library)، استفاده شده است. این

سازگاری با ابزارهای تحلیلی مختلف، به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا سامانه‌ای دقیق، کارآمد و قابل اعتماد ایجاد کنند که به سرعت به تغییرات محیطی واکنش نشان دهد (Obe & Hsu, 2015).
باتوجه به مطالب ذکر شده، به‌طور خلاصه دلایل انتخاب بسترهای مورد استفاده برای توسعه سامانه هشدار سیل در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج و بحث

سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل

سامانه هشدار سیل وظیفه پیش‌بینی بارش، سیل و ارائه پیام‌های هشدار را به کاربران سامانه بر عهده دارد. خروجی‌های این سامانه در قالب‌های گوناگون اعم از نمایش نقشه، جدول، نمودار، پیام متنی و غیره تهیه شده و متناسب با سطوح دسترسی تعریف شده در اختیار کاربران سامانه قرار می‌گیرد. لازمه دستیابی به این هدف، کوپل مدل‌های عددی آب و هوایی، مدل بارش-رواناب و مدل هیدرولیک و پهنه‌بندی سیل است که به‌طور یکپارچه برای محاسبه میزان و پهنه رواناب اجرا می‌شوند. پنجره مشاهده پهنه سیل در شکل ۷ و چند نمونه از اجزای سامانه در شکل ۸ نشان داده شده است.

در این سامانه، با انتخاب تاریخ و اجرای مدل توسط کاربر، سامانه به‌صورت خودکار داده‌های هواشناسی GFS را دانلود کرده و مدل WRF را اجرا می‌کند. پس از اجرای مدل WRF، سری زمانی بارش در مرکز هر زیرحوضه استخراج می‌شود. حجم داده‌های ورودی مدل برای منطقه مطالعاتی حدود ۱ گیگابایت و حجم داده‌های خروجی آن حدود ۱ مگابایت می‌باشد. برای بهینه‌سازی فضای ذخیره‌سازی، پس از اجرای مدل WRF، داده‌های ورودی حذف شده و تنها خروجی مدل که شامل سری زمانی بارش است نگهداری می‌شود. این سری زمانی سپس به مدل HEC-HMS وارد می‌شود تا رواناب در خروجی زیرحوضه‌ها محاسبه گردد. کاربر می‌تواند با اجرای این مدل، سری زمانی دبی خروجی را از طریق انتخاب ایستگاه‌ها در رابط کاربری مشاهده نماید. با توجه به وسعت زیاد منطقه مورد مطالعه، اجرای مدل پهنه‌بندی سیل برای کل منطقه نیازمند توان پردازشی و فضای ذخیره‌سازی بالایی است. به همین دلیل، مدل دوبعدی HEC-RAS تنها برای دو ناحیه بعد از سد گلستان و محدوده شهر آق قلا مشخص شده و در دسترس کاربر قرار دارد. کاربر با انتخاب هر ناحیه و اجرای مدل می‌تواند نقشه پهنه سیل را مشاهده کند. این رویکرد بهینه‌سازی منابع و دسترسی سریع به نتایج را برای کاربر فراهم می‌کند.

"Virtual DOM"، سامانه قادر است به شکل کارآمد تنها بخش‌هایی از رابط کاربری را که تغییر کرده‌اند به‌روزرسانی کند؛ این ویژگی در ارائه اطلاعات دقیق و لحظه‌ای در شرایط اضطراری بسیار اهمیت دارد. همچنین، استفاده از کامپوننت‌ها در React به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا بخش‌های مختلف سامانه، مانند نقشه‌های تعاملی، نمودارهای زمانی و نمایش هشدارها را به‌صورت ماژولار و مستقل طراحی کنند. این امر فرآیند توسعه را بهینه کرده و مدیریت سیستم را تسهیل می‌کند. این قابلیت‌ها برای سامانه‌های حساس و پیچیده‌ای مانند سامانه هشدار سیل که نیاز به واکنش سریع و دقیق دارند، ضروری بوده و موجب افزایش کارایی و اعتمادپذیری سیستم می‌شود.

• Back-End

در سامانه هشدار سیل که مبتنی بر WebGIS است، از Django به‌عنوان بستر نرم‌افزاری سمت سرور استفاده شده است. Django که بر پایه زبان Python توسعه یافته، به‌دلیل ساختار ماژولار، مقیاس‌پذیری بالا و امنیت پیش‌فرض، توسعه سریع و پایدار برنامه‌های وب پیچیده را امکان‌پذیر می‌کند. انتخاب Python برای این سامانه مزیت‌های زیادی دارد، از جمله سادگی و خوانایی بالای کد که باعث کاهش زمان توسعه و سهولت در نگهداری و به‌روزرسانی سامانه می‌شود. Python همچنین با PostgreSQL و ابزارهای تحلیلی مختلف به خوبی سازگار است و به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهد تا داده‌های مکانی و زمانی را به سرعت پردازش کرده و ارتباطات پیچیده بین مدل‌های داده را به راحتی مدیریت کنند. این قابلیت‌ها در سامانه هشدار سیل، که نیاز به پردازش بلادرنگ و ارائه هشدارهای دقیق دارد، بسیار حیاتی است و موجب افزایش کارایی، سرعت توسعه و اعتمادپذیری سیستم می‌شود.

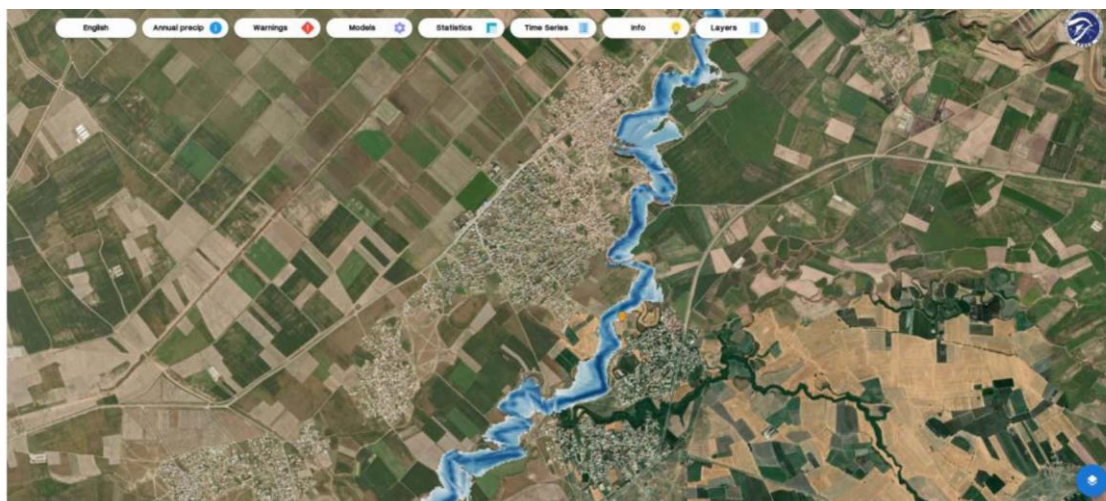
پایگاه داده

در سامانه هشدار سیل، از PostgreSQL به‌عنوان پایگاه داده مکانی استفاده شده است. این پایگاه داده، که یکی از محبوب‌ترین گزینه‌ها برای توسعه برنامه‌های وب است، به‌دلیل قابل اعتماد بودن، مقیاس‌پذیری بالا و توانایی مدیریت داده‌های حجیم انتخاب شده است. PostgreSQL با افزونه PostGIS، پشتیبانی کاملی از داده‌های مکانی ارائه می‌دهد و امکان پردازش و تحلیل دقیق و کارآمد داده‌های جغرافیایی را فراهم می‌کند. این ویژگی برای سامانه‌های هشدار سیل، که نیاز به مدیریت بلادرنگ و تحلیل سریع داده‌های مکانی دارند، بسیار حیاتی است. در مقایسه با سایر پایگاه‌های داده مانند MySQL و MongoDB، PostgreSQL با پشتیبانی بومی از داده‌های مکانی و

جدول ۱- خلاصه دلایل انتخابی اجزای نرم‌افزاری سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل

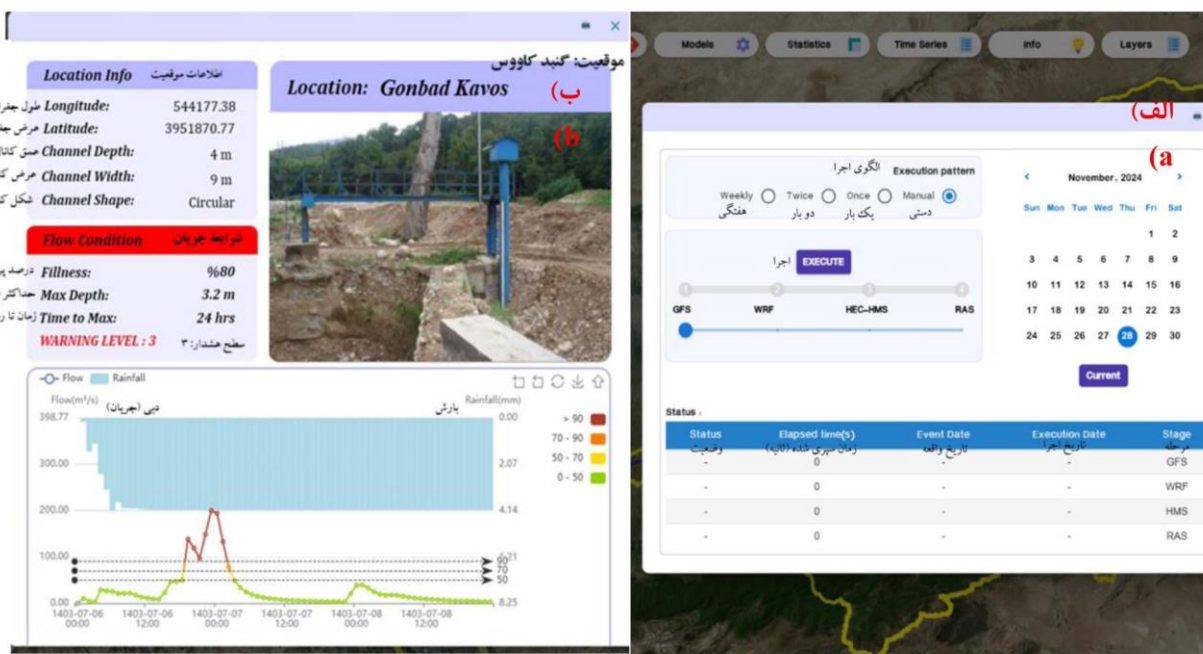
Table 1- Summary of the selection rationale for the software components of the flood forecasting and warning system

سمت پیاده‌سازی Implementation Side	انتخاب Selection	زیربخش Subsection	دلایل Reasons
سمت کاربر (Client-Side)	React	رابط گرافیکی Graphical Interface	متن‌باز (Open-source) مدیریت زمان واقعی DOM (نمایش زمان واقعی تغییرات در سایت) (Real-time DOM management) برنامه‌نویسی دستوری (Declarative programming) قابلیت استفاده مجدد از کامپوننت‌های طراحی شده (Reusability of designed components) امکان ادغام با کتابخانه‌های دیگر مانند GraphQL (Ability to integrate with other libraries like GraphQL) ارائه سرعت بالاتر در مقایسه با رقبای بکارگیری VirtualDOM (Higher performance compared to competitors by using a Virtual DOM) امکان توسعه برای اپلیکیشن موبایل (Mobile application development capability) جامعه بزرگ و فعال (Large and active community)
			متن‌باز (Open-source) کار با تمامی مرورگرها (Cross-browser compatibility) تنوع کار با فرمت‌های مختلف داده‌های مکانی (Support for various spatial data formats) قابلیت توسعه (Extensibility) ارائه توابع آماده کامل‌تر در مقایسه با رقبای (More comprehensive built-in functions compared to competitors) مستندات کامل (Complete documentation) قابلیت نمایش سه‌بعدی (3D display capability) پشتیبانی از فرمت PBF (Support for PBF format)
سمت سرور (Server-Side)	Python / Django	زبان برنامه‌نویسی Programming Language	متن‌باز (Open-source) سینتکس ساده و خطاگیری آسان (Simple syntax and easy debugging) پشتیبانی گسترده از محاسبات علمی و ریاضی و محاسبات (Extensive support for scientific and mathematical computations) کار با پلتفرم‌های مختلف مانند ویندوز و لینوکس و Cross-platform support, e.g., Windows and Linux وجود کتابخانه‌های گسترده مکانی (Availability of extensive geospatial libraries) وجود کتابخانه‌های مختلف ارتباط با مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (Availability of various libraries for interfacing with hydraulic and hydrological models) استقبال گسترده عمومی (Wide adoption and large community)
سمت سرور (Server-Side)	PostgreSQL	پایگاه داده Database	متن‌باز (Open-source) پایداری بالا (Reliability and Stability) قابلیت توسعه (Extensibility) مقیاس‌پذیر (Scalability) مطابقت با قاعده‌ی ACID مدیریت کارآمدتر داده‌های مکانی با افزونه PostGIS
			متن‌باز (Open-source) کار با پلتفرم‌های مختلف مانند ویندوز و لینوکس و Cross-platform support, e.g., Windows and Linux قابلیت افزودن یا ساختن ماژول‌های جدید (Ability to add or create new modules) ارائه سرویس‌های متنوع نقشه بر اساس استانداردهای OGC (Provides various map services based on OGC standards) پشتیبانی از اکثر فرمت داده‌های مکانی (Support for most spatial data formats)



شکل ۷- نمایش پهنه سیل و مشاهده عمق در نقاط مختلف

Figure 7- Display of the flood inundation area and viewing depth at different points



شکل ۸- بخش‌های مختلف سامانه هشدار سیل: (الف) پنجره اجرای مدل‌ها، (ب) سری زمانی عمق نقاط مختلف و تصویر محل

Figure 8- Different sections of the flood warning system: a) Model execution window, b) Time series of depth at different points and an image of the location

اجرا و ارزیابی مدل پیش‌بینی بارش

با توجه به اینکه مدل WRF به‌عنوان یک مدل رایگان در دسترس، از محبوبیت جهانی برخوردار است و در حال حاضر، به‌عنوان مدل اصلی پیش‌بینی بارش توسط سازمان هواشناسی کشور مورد استفاده است، در

این پژوهش، از آن به‌عنوان مدل پیش‌بینی بارش‌های حوضه آبریز گرگان‌رود استفاده شد. با بررسی و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده بارش، پنج واقعه برای مدلسازی WRF و بررسی عملکرد آن انتخاب شده‌اند. زمان رخداد هر واقعه و ایستگاه‌های باران‌سنجی آن در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲- وقایع بارش- رواناب منتخب حوضه آبریز گرگانرود برای مدلسازی WRF
Table 2- Selected Rainfall-Runoff events in the Gorganroud watershed for WRF modeling

واقعه Event	1392/01/29 2013/04/18	1390/07/27 2011/10/19	1395/03/23 2016/06/12	1395/01/03 2016/03/22	1394/10/19 2016/01/09
ایستگاه باران‌سنجی Rain Gauge Station	گلیداغ، تمر Golidagh, Tamar	گلیداغ، تمر Golidagh, Tamar	گلیداغ Golidagh	گلیداغ، دشت، دشت شاد Golidagh, Dasht, Dasht-e Shad	گلیداغ Golidagh

جدول ۳ ارائه شده است که در آن O_i مقدار مشاهداتی، P_i مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد کل داده‌ها است) شامل ضریب همبستگی، خطای جذر میانگین مربعات، ضریب نش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق، بیشترین خطای مطلق و درصد خطای نسبی^۱، می‌توان مناسب‌ترین افق زمانی پیش‌بینی را تعیین کرد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که با وجود نزدیکی شاخص‌های خطا در مدل‌های پیش‌بینی بارش مبتنی بر افق‌های زمانی مختلف، مدل پیش‌بینی با افق زمانی ۶ ساعته در مقایسه با سایر مدل‌ها، از دقت مطلوب‌تری برخوردار است.

به‌منظور بررسی تأثیر افق‌های زمانی پیش‌بینی مختلف در دقت مدلسازی، پس از تعیین مناسب‌ترین طرحواره‌های میکروفیزیک و همرفت، مدلسازی WRF با در نظر گرفتن افق‌های زمانی پیش‌بینی مختلف انجام می‌شود. مقادیر بارش مشاهداتی با در نظر گرفتن پنج افق زمانی ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و ۴۸ ساعت به‌عنوان زمان پیش‌بینی با استفاده از مدل WRF تخمین زده می‌شوند. با مقایسه وقایع مشاهداتی مندرج در جدول ۲ و مقادیر تخمین زده شده بارش توسط مدل WRF در افق‌های زمانی مختلف توسط آماره‌های ارزیابی (که روابط آن‌ها در

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی خطا

Table 3- Error evaluation statistics

ضریب همبستگی (Coefficient of Determination)	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$
ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$
ضریب کارایی نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$
میانگین خطای مطلق (Mean Absolute Error, MAE)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - O_i }{n}$
بیشترین خطای مطلق (Absolute Maximum Error, AME)	$AME = \max_{i=1} P_i - O_i $

جدول ۴- مقایسه دقت افق‌های زمانی مدل WRF در پیش‌بینی بارش کوتاه مدت

Table 4- Accuracy comparison of the WRF model's time horizons in short-term precipitation forecasting

ردیف Row	افق زمانی پیش‌بینی Forecast Time Horizon	آماره‌های ارزیابی Evaluation Statistics					
		RE = $\left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \times 100 \right)$	AME	MAE	NSE	RMSE	R ²
1	6 ساعت 6 hours	0.73	20.15	10.64	0	12.25	0.69
2	12 ساعت 6 hours	0.76	23.16	10.99	0.05	12.92	0.62
3	18 ساعت 6 hours	0.76	23.11	11.74	-0.2	13.75	0.62
4	24 ساعت 6 hours	0.84	23.1	11.44	-0.15	13.49	0.67
5	48 ساعت 6 hours	0.79	24.15	11.41	-0.12	13.79	0.58

توسط باران‌سنج‌ها به هر دلیلی ثبت نشده باشند (کیفیت داده‌های بارش) یا ضعف خود مدل بارش-رواناب باشند. در مجموع اگرچه انطباق کامل در تمام بخش‌های هیدروگراف وجود ندارد (به‌ویژه برای ایستگاه‌های باغ‌سالیان و گالیکش که می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های بالاتر داده یا پیچیدگی‌های محلی آن زیرحوضه‌ها باشد)، اما با توجه به موفقیت مدل در تخمین پارامتر کلیدی دبی اوج، روند و شکل هیدروگراف‌های بدست آمده با هیدروگراف‌های مشاهداتی هم‌خوانی دارد و لذا مقدار پارامترهای واسنجی یعنی درصد نفوذناپذیری و عدد منحنی در زیرحوضه‌های بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری نوده (خرمالو)، ارازکوسه، باغ‌سالیان، تنگراه و گالیکش مناسب در نظر گرفته شده است.

نکته بسیار مهم در واسنجی مدل بارش-رواناب حوضه گرگانرود (و البته اکثر حوضه‌های سیل‌خیز ایران) این است که بدلیل نبود تعداد ایستگاه هیدرومتری کافی بخصوص بر روی مسیر اصلی رودخانه گرگانرود، زیرحوضه‌های مختلفی امکان کالیبراسیون مستقیم ندارند. لذا برای تنظیم پارامترهای این زیرحوضه‌ها از تشابه خصوصیات فیزیگرافی آنها با زیرحوضه‌های کالیبره شده با تکنیک خوشه‌بندی استفاده شده است. بعبارت دیگر، در این روش، از مقادیر واسنجی شده پارامترها در زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری برای تخمین مقادیر پارامترهای واسنجی در زیرحوضه‌های مشابه اما فاقد ایستگاه هیدرومتری استفاده می‌شود (Alizadeh, 2022).

اجرای مدل هیدرولیکی و پهنه بندی سیل

نتایج مدل‌سازی شامل پهنه‌های عمق و سرعت جریان و هیدروگراف‌های سیلاب در نقاط مختلف رودخانه-سیلابدشت است. با توجه به حجم زیاد نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب بدست آمده از مدل، در ادامه بعنوان نمونه برخی از این نقشه‌ها و فقط برای سناریوی سیلاب سال ۹۸ (بزرگترین سیلاب مورد بررسی) ارائه شده است. بطور مشابه برای بقیه سناریوهای سیلاب نیز این نتایج براحتی از مدل قابل دستیابی است. در شکل ۱۳ نقشه‌ی حداکثر پهنه‌بندی عمق در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ در محدوده بعد از سد گلستان نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۴ نقشه‌ی حداکثر پهنه‌بندی سرعت سیلاب نشان داده است.

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های به‌کاررفته برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز گرگانرود، عملکرد قابل قبولی داشته‌اند. با این حال، همچون هر مدل‌سازی عددی دیگری، برخی

همچنین با توجه به تداوم زمانی وقایع مورد استفاده، با انتخاب افق زمانی شش ساعته برای پیش‌بینی و نیز بروزرسانی مقادیر بارش، تعداد گام‌های بروزرسانی بیشتر خواهد بود و نتایج حاصل از فرآیند بروزرسانی پیش‌بینی‌ها ملموس‌تر خواهد بود. بنابراین در این پژوهش، افق زمانی ۶ ساعته برای پیش‌بینی بارش انتخاب شده است. جزئیات پیکره‌بندی مدل WRF مبتنی بر زمان پیش‌بینی ۶ ساعت و نیز دامنه‌های تعریف شده در مدل‌سازی WRF محدوده مطالعاتی، به‌ترتیب در شکل ۹ و جدول ۵ ارائه شده است.

همچنین نقشه توزیع مکانی بارش‌های پیش‌بینی شده WRF در وقایع سیلابی ۱۳۹۸/۰۱/۳۰ و ۱۳۹۸/۰۱/۰۵ در چهار گام زمانی ترسیم شده و در شکل ۱۰ ارائه شده است.

اجرا و ارزیابی مدل بارش-رواناب

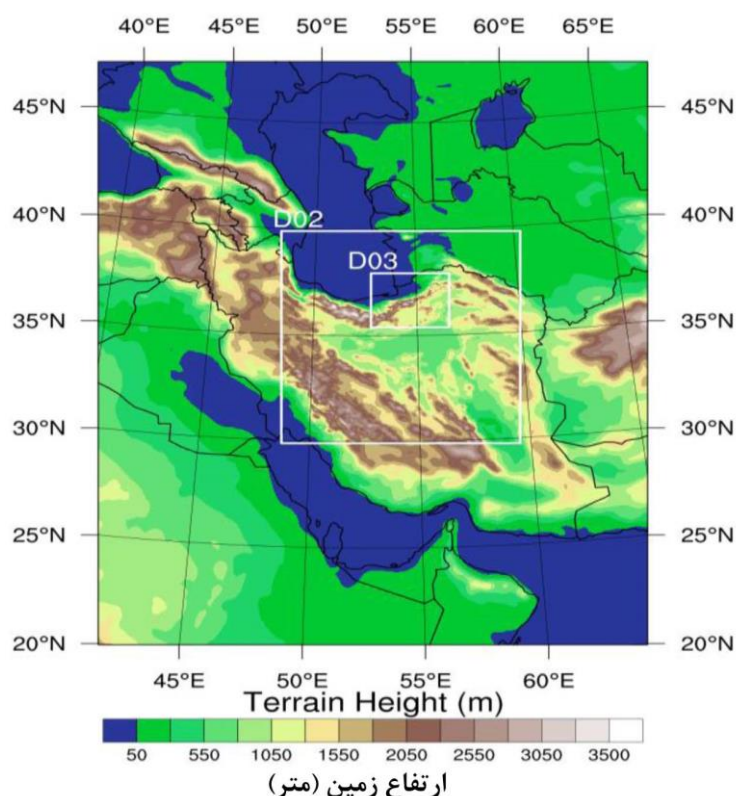
واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS

در این بخش از تحقیق به فرآیند شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل بارش-رواناب حوضه گرگانرود می‌پردازد. در طی فرآیند واسنجی ابتدا مقادیر پارامترهای مهم در زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری واقع در محدوده مطالعاتی تعیین می‌شود. ایستگاه‌های هیدرومتری نوده، ارازکوسه، باغ‌سالیان، تنگراه و گالیکش از جمله ایستگاه‌های واقع در سرشاخه‌های شبکه رودخانه‌های محدوده مطالعاتی هستند که برای واسنجی زیرحوضه‌های منتهی به این ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از بارش‌های ثبت شده در هر واقعه سیلابی برای تخمین بارش در مراکز زیرحوضه‌های مورد نظر برای واسنجی به روش IDW استفاده شده است. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی زیرحوضه‌های دارای ایستگاه هیدرومتری در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۱ و شکل ۱۲، لازم به توضیح است که هدف اصلی فرآیند واسنجی برای یک سامانه هشدار سیل، شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر مقدار و زمان وقوع دبی اوج (Peak Discharge) است. همانطور که در اکثر نمودارها مشخص است، مدل در دستیابی به این هدف اولیه عملکرد موفقی داشته و هیدروگراف‌های سیل به خصوص برای دبی اوج به خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شده‌اند. در خصوص حجم سیل اختلاف بیشتری مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد. این عوامل می‌تواند خطاهای ناشی از عدم قطعیت توزیع مکانی بارش، خطاهای ناشی از روش اندازه‌گیری دبی و عملکرد ضعیف 'اشفت‌انکودرها در جریان‌های سیلابی (کیفیت داده‌های هیدرومتری)، عدم لحاظ حجم رواناب‌های ناشی از بارش‌های ساعت‌های قبلی که

می‌تواند زمان زیادی را طلب کند. از سوی دیگر، اجرای مدل‌های پیچیده هیدرولوژیکی و هیدرولیکی همچون HEC-HMS یا HEC-RAS نیز به قدرت پردازش بالا نیاز دارد. این مسئله باعث می‌شود که در شرایط بحرانی که نیاز به واکنش سریع وجود دارد، کارایی مدل کاهش یابد.

چالش‌ها و محدودیت‌هایی وجود دارند که باید به آن‌ها توجه شود. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در اجرای این مدل‌ها، نیاز به سیستم‌های محاسباتی قدرتمند و زمان‌بر بودن ران‌های طولانی مدت مدل است. به‌خصوص در مورد مدل WRF که برای شبیه‌سازی بارش‌های منطقه‌ای استفاده شده، اجرای آن بر روی سیستم‌های ضعیف یا متوسط



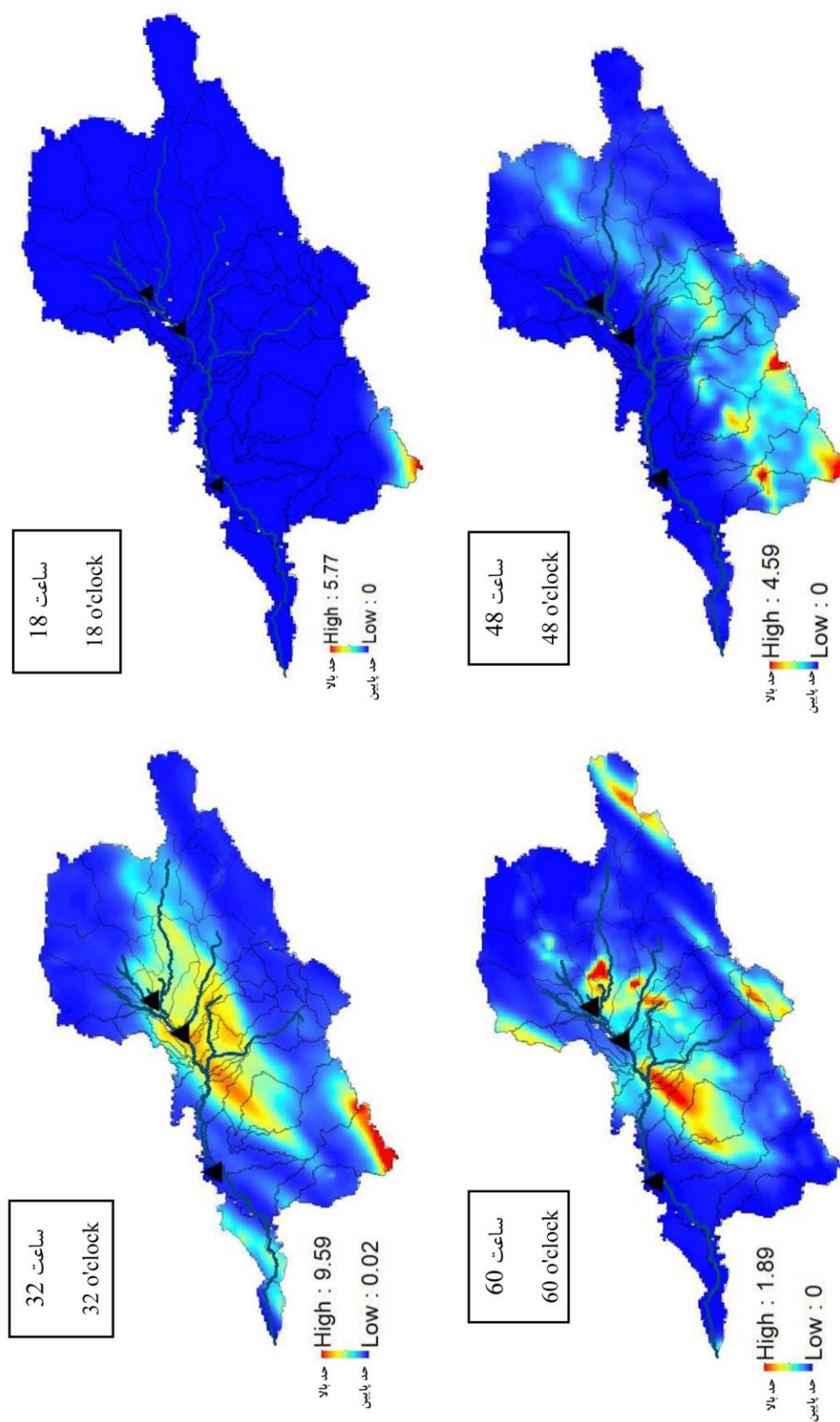
شکل ۹- محدوده دامنه‌های تعریف شده برای شبیه‌سازی جو در مدل WRF برای حوزه آبریز گرگانرود

Figure 9- The extent of the defined domains for atmospheric simulation in the WRF model for the Gorganroud watershed

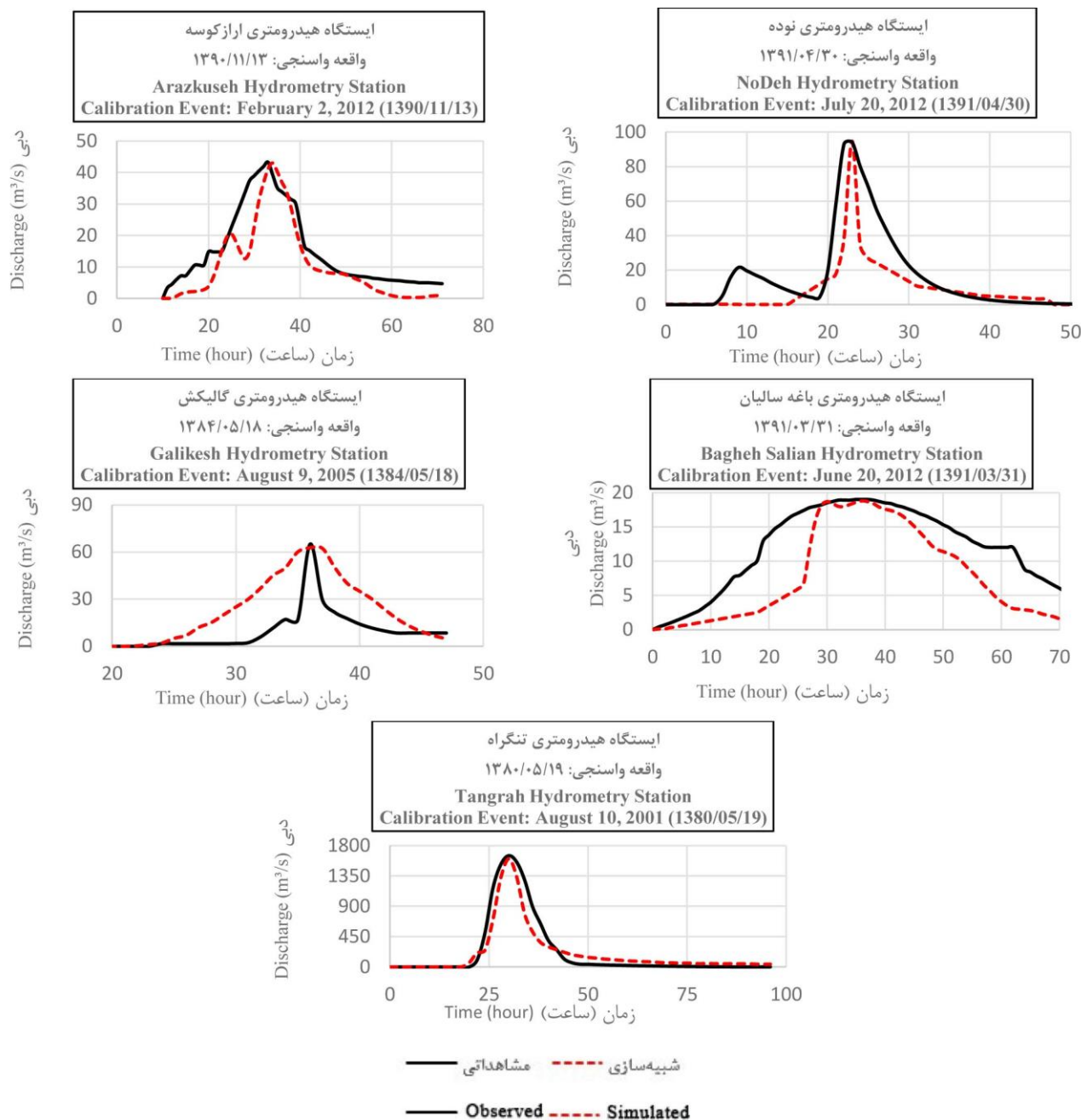
جدول ۵- جزئیات پیکره‌بندی مدل WRF برای حوزه آبریز گرگانرود

Table 5- Configuration details of the WRF model for the Gorganroud watershed

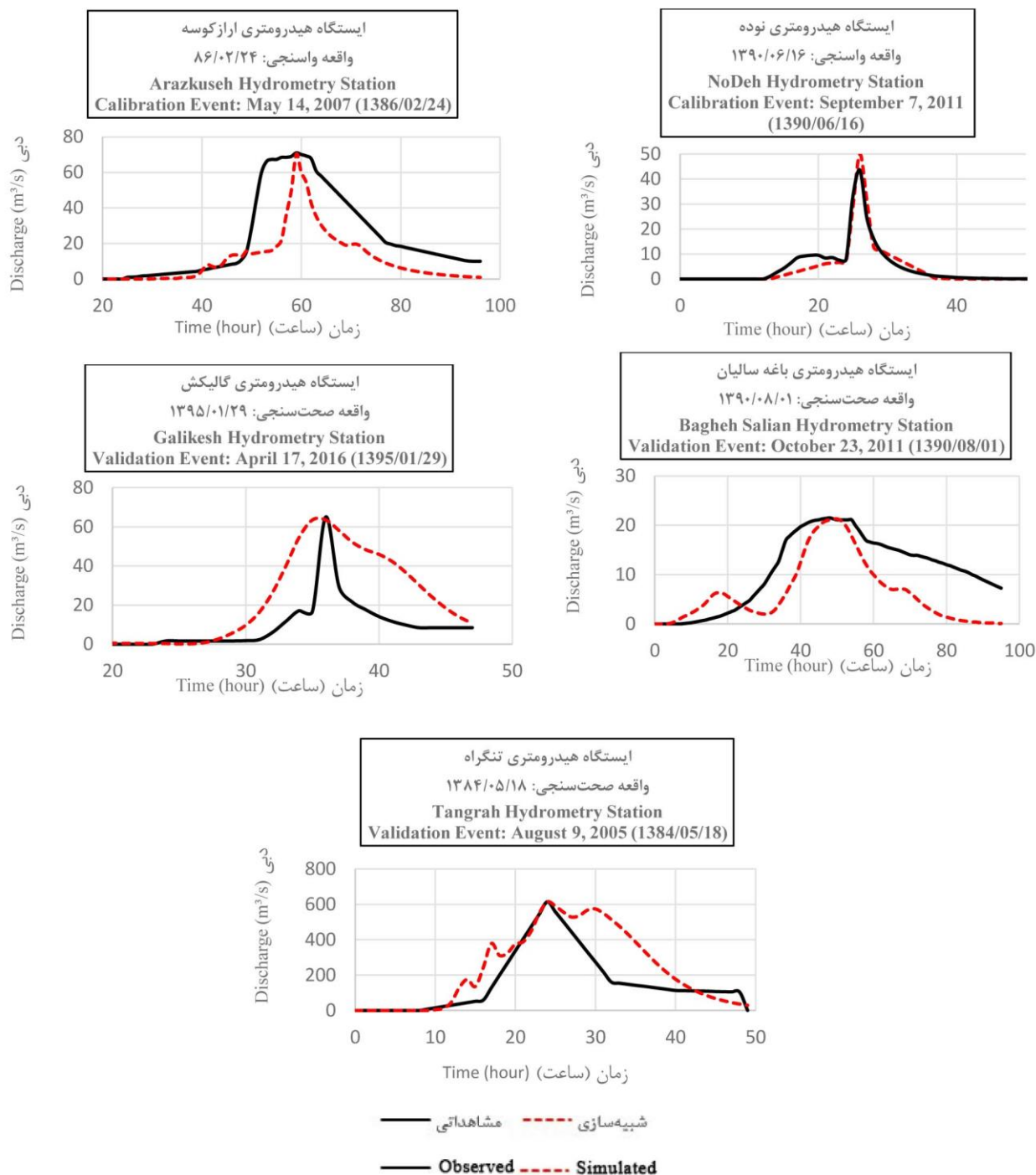
دینامیک	غیر هیدرواستاتیک
Dynamics	Non-hydrostatic
رزولوشن قائم	سطح 27
Vertical resolution	27 levels
رزولوشن افقی	دامنه 1: 18/7 کیلومتر، دامنه 2: 6/23 کیلومتر، دامنه 3: 2/07 کیلومتر (نسبت دامنه‌ها: 1 به 3)
Horizontal resolution	Domain 1: 18.7 km, Domain 2: 6.23 km, Domain 3: 2.07 km (Ratio: 1 to 3)
فرکانس زمانی خروجی‌ها	1 ساعت
Output time frequency	1 hour
طرحواره میکروفیزیک	Liu et al.
Microphysics scheme	
طرحواره همرفت	Grell 3D ensemble
Convection scheme	
طرحواره طول موج بلند	rrtm scheme
Longwave radiation scheme	
طرحواره طول موج کوتاه	Dudhia scheme
Shortwave radiation scheme	
طرحواره سطح زمین	Unified Noah land-surface model
Land surface scheme	
طرحواره لایه مرزی	YSU scheme
Boundary layer scheme	



شکل ۱۰- نقشه توزیع مکانی بارش‌های پیش‌بینی شده WRF در واقعه سیلابی ۱۳۹۸/۰۱/۰۵
Figure 10- Map of the spatial distribution of WRF-predicted precipitation during the flood event of March 25, 2019 (1398/01/05)



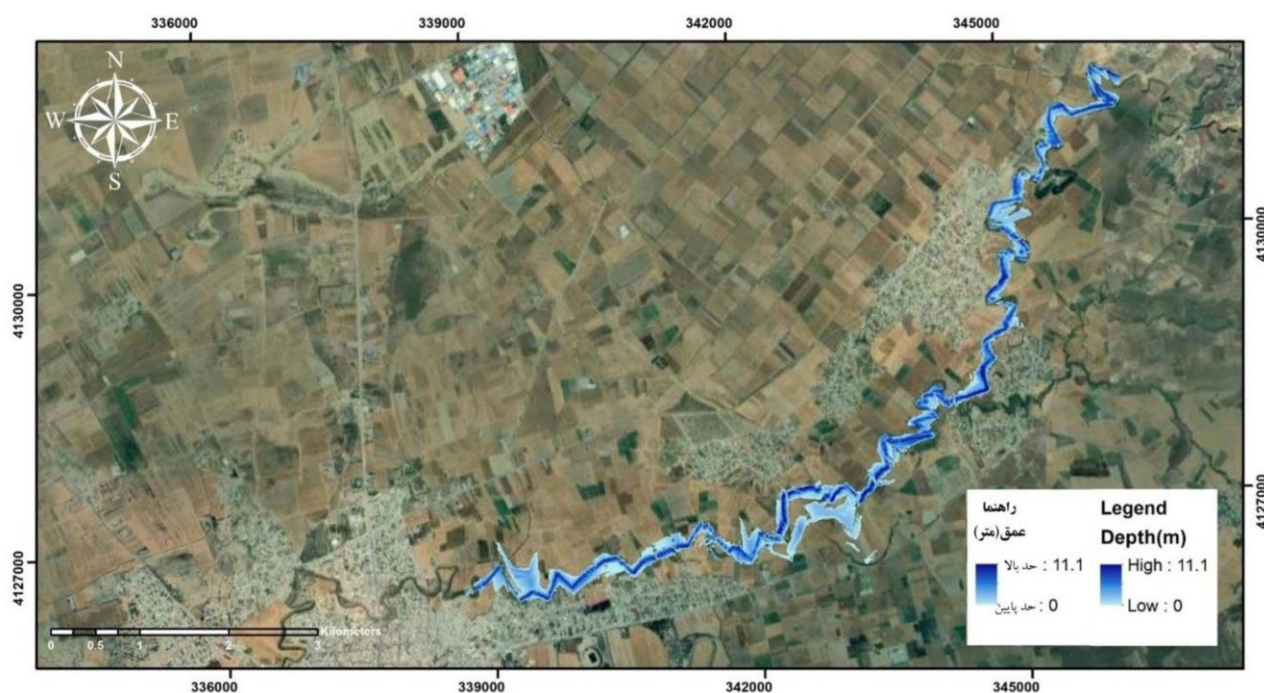
شکل ۱۱- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در واسنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS/ برای حوزه آبریز گرگانرود
Figure 11- Observed and simulated hydrographs in the calibration of the HEC-HMS rainfall-runoff model for the Gorganroud watershed



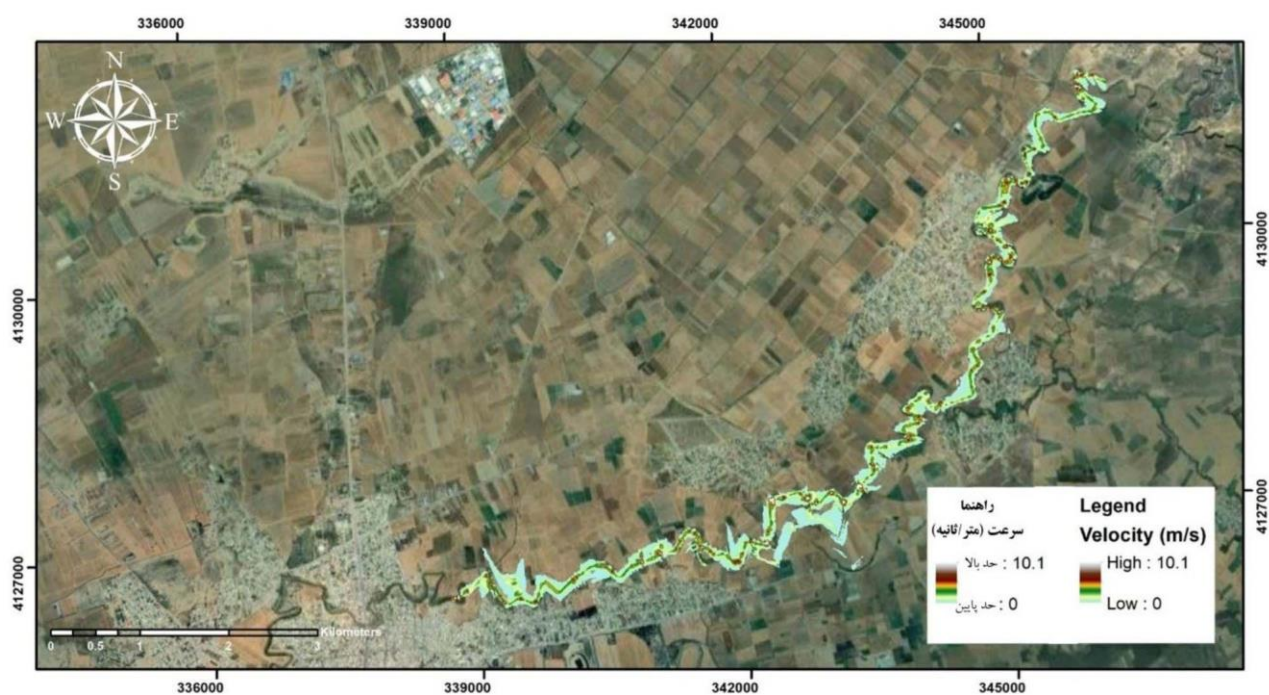
شکل ۱۲- هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS برای حوضه آبریز گرگانرود
Figure 12- Observed and simulated hydrographs in the validation of the HEC-HMS rainfall-runoff model for the Gorganroud watershed

قابل توجهی کاهش دهد و همچنین ناپایداری‌هایی که ممکن است به دلیل ضعف سخت‌افزاری رخ دهند، برطرف گردد.

راهکار پیشنهادی برای رفع این مشکل، استفاده از رایانش ابری یا سیستم‌های موازی است. سیستم‌های ابری امروزه امکان اجرای مدل‌های پیچیده عددی را با ظرفیت محاسباتی بالا فراهم می‌کنند. استفاده از چنین زیرساخت‌هایی می‌تواند زمان اجرای مدل‌ها را به‌طور



شکل ۱۳- حداکثر پهنه عمق سیل در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ بعد از سد گلستان بر روی نقشه گوگل ارث
Figure 13- Maximum flood depth inundation area in the event of March 25, 2019 (Farvardin 5, 1398) downstream of the Golestan Dam on a Google Earth map



شکل ۱۴- حداکثر پهنه سرعت سیل در واقعه ۵ فروردین سال ۹۸ بعد از سد گلستان بر روی نقشه گوگل ارث
Figure 14- Maximum flood velocity inundation area in the event of March 25, 2019 (Farvardin 5, 1398) downstream of the Golestan Dam on a Google Earth map

این مطالعه، به منظور حفظ یکپارچگی روش‌شناسی در مقیاس بزرگ حوضه، از یک رابطه واحد مبتنی بر شیب استفاده شد. نویسندگان اذعان دارند که این رویکرد یک ساده‌سازی قابل توجه است، زیرا در محیط‌های شهری، کاربری اراضی و موانع انسان‌ساخت عامل اصلی کنترل‌کننده زبری هیدرولیکی هستند. با توجه به اینکه هدف اصلی، توسعه یک سامانه پیش‌بینی منطقه‌ای برای کل حوضه بود، تهیه نقشه دقیق زبری شهری خارج از محدوده این تحقیق تعریف گردید. با این حال، عملکرد قابل قبول کل سامانه در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که این ساده‌سازی، توانایی کلی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل را به‌طور کامل از بین نبرده است. با این وجود، قویاً پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با تهیه نقشه‌های زبری مبتنی بر کاربری اراضی، دقت مدل در پهنه‌بندی سیلاب در مقیاس محلی و شهری به شکل چشمگیری افزایش یابد.

در مجموع، با به‌کارگیری راهکارهایی مانند استفاده از سیستم‌های رایانش ابری برای کاهش زمان اجرا، بهبود واسنجی مدل‌ها با داده‌های بیشتر و متنوع‌تر، و ادغام مدل‌های مختلف برای بهبود پایداری، می‌توان نتایج بهتری در پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها به دست آورد. استفاده از زیرساخت‌های مدرن مانند AWS^۱ یا Google Cloud نه تنها زمان محاسبات را کاهش می‌دهد، بلکه به مدیریت بهتر و دقیق‌تر سیلاب‌ها کمک شایانی خواهد کرد. در این پژوهش نیز استفاده از سیستم HPC دانشگاه شهید بهشتی امکان اجرای سریع‌تر و دقیق‌تر مدل‌ها را فراهم کرده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی جامع و چندوجهی هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حوضه آبریز گرگانرود با بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته مانند مدل‌های WRF، HEC-HMS و HEC-RAS انجام شد. این فرآیند شامل پیش‌بینی بارش، شبیه‌سازی دقیق بارش-رواناب و پهنه‌بندی سیلاب است که به‌طور هم‌زمان از داده‌های برخط جهانی، اطلاعات هیدرومتری، هیدرولوژیکی و شرایط محیطی منطقه بهره برده شد.

مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب و ارزیابی پارامترهای هیدرولوژیکی، عملکرد خوبی از خود نشان دادند. نتایج این مدل، به‌ویژه در شبیه‌سازی هیدروگراف‌ها، تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشت و توانایی آن در بازتولید سیلاب‌های واقعی منطقه اثبات شد. همچنین، مدل دو بعدی HEC-RAS با شبیه‌سازی سیلاب در دشت‌های سیلابی و مناطق شهری، اطلاعات ارزشمندی در مورد

به‌عنوان مثال، در این مطالعه، از مرکز پردازش‌های سریع (HPC) دانشگاه شهید بهشتی برای اجرای مدل‌ها استفاده شده است. این مرکز محاسباتی شامل دو فاز پردازشی با مجموع بیش از ۸۰۰ هسته از نوع Intel Xeon، بیش از ۶ ترابایت حافظه رم، و گره‌های مجهز به پردازنده‌های گرافیکی (GPU) از نوع NVIDIA Tesla K40m است که بر روی سیستم‌عامل CentOS و شبکه InfiniBand فعالیت می‌کند. این سیستم به‌دلیل توان محاسباتی بالای خود، قادر به اجرای مدل WRF و مدل‌های هیدرولوژیکی در زمان کوتاه‌تر و با دقت بالاتر بوده است.

چالش دوم که ممکن است در طول اجرای مدل‌ها با آن مواجه شویم، امکان ناپایداری مدل‌ها به‌ویژه در شرایط مرزی پیچیده یا در زمان شبیه‌سازی وقایع بارشی بسیار شدید است. مدل‌هایی مانند WRF و HEC-RAS به‌دلیل حساسیت به پارامترهای ورودی و شرایط اولیه ممکن است در برخی موارد ناپایداری‌هایی نشان دهند که می‌تواند به نتایج نادرست منجر شود. این ناپایداری می‌تواند ناشی از مشکلاتی نظیر داده‌های ناقص، شرایط مرزی نامطمئن یا تنظیمات نادرست مدل باشد. برای رفع این چالش، واسنجی دقیق‌تر مدل‌ها از طریق استفاده از داده‌های بیشتر و تحلیل حساسیت پارامترها ضروری است. در صورتی که امکان جمع‌آوری داده‌های محلی بیشتری فراهم شود، می‌توان واسنجی مدل را بهبود بخشید و پارامترهای حساس مانند عدد منحنی (CN)، زمان تأخیر (Lag-time)، و ضریب مانینگ را با دقت بالاتری تنظیم کرد. همچنین، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های راداری برای بهبود دقت بارش‌های ورودی به مدل می‌تواند پایداری نتایج را تقویت کند.

علاوه بر این، استفاده از مدل‌های ترکیبی که بتوانند از نقاط قوت چند مدل مختلف بهره‌مند شوند نیز می‌تواند به کاهش ناپایداری کمک کند. برای مثال، مدل WRF می‌تواند برای پیش‌بینی بارش استفاده شود و سپس این داده‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی دقیق‌تری مانند HEC-HMS به‌کار گرفته شوند تا روندیابی سیلاب‌ها با دقت بیشتری انجام شود.

چالش سوم مربوط به کمیت و کیفیت داده‌های وقایع مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب است. این محدودیت می‌تواند اعتمادپذیری نتایج مدل را در تحت تأثیر قرار دهد. هر چند استفاده از داده‌های مشاهداتی چند واقعه سیلابی در این مطالعه، تا حدی نیاز واسنجی را برطرف کرده، اما برای حصول نتایج دقیق‌تر، به داده‌های بیشتر و دقیق‌تری نیاز است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش، روش تخمین ضریب زبری مانینگ، به‌ویژه در مناطق شهری مانند آق‌قلا است. در

برنامه‌نویسی Python و بستر توسعه تحت وب Django انتخاب شده‌اند که با ترکیب سرعت و انعطاف‌پذیری، امکان مدیریت بهینه پردازش‌ها را فراهم می‌کنند. همچنین، از پایگاه داده PostgreSQL به همراه افزونه مکانی PostGIS برای ذخیره‌سازی داده‌های مکانی و تحلیلی استفاده شده است، که عملکرد سامانه را در مدیریت داده‌های حجیم و پیچیده تضمین می‌کند. نقشه‌های سامانه نیز با استفاده از نرم‌افزار GeoServer به صورت آنی ارائه می‌شوند، که دقت بالایی در نمایش نتایج مکانی و پیش‌بینی سیلاب دارد. این زیرساخت قوی، سامانه‌ای پیشرفته، کارآمد و دقیق را برای مدیریت بحران سیلاب فراهم کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پیشرفته و ترکیب نتایج آنها، همراه با مدل WRF برای پیش‌بینی بارش‌ها، می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها و بهبود مدیریت منابع آب کمک کند. دستاوردهای این تحقیق می‌تواند به عنوان الگویی مؤثر برای سایر حوضه‌های آبریز مشابه در کشور و منطقه مورد استفاده قرار گیرد و راهکارهای نوین برای مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب ارائه دهد.

عمق و سرعت جریان سیلاب‌ها ارائه کرد. این اطلاعات برای مدیریت بهینه سیلاب و برنامه‌ریزی‌های زیرساختی در مناطق پرخطر بسیار مفید واقع شد.

یکی از دستاوردهای مهم این تحقیق، موفقیت مدل WRF در پیش‌بینی قابل قبول بارش‌ها بود. مدل WRF با دقت قابل قبولی توانست مقادیر بارش پیش‌بینی شده را با داده‌های مشاهداتی مقایسه کند و نتایج خوبی ارائه دهد. این مدل به‌ویژه در شبیه‌سازی مقادیر بارش تجمعی و توزیع زمانی آن، نشان‌دهنده دقت و کارایی بالا بود. استفاده از پیش‌بینی‌های مدل WRF، که به‌طور مؤثری قادر به پیش‌بینی بارش‌ها در مقیاس زمانی و مکانی دقیق است، به تقویت فرآیند مدل‌سازی بارش - رواناب و بهبود پیش‌بینی‌های سیلاب کمک کرد.

به این ترتیب، مدل‌های WRF، HEC-HMS و HEC-RAS به‌صورت هماهنگ برای شبیه‌سازی بارش، فرآیند بارش - رواناب، و پهنه‌بندی دقیق سیلاب‌ها به کار گرفته شده‌اند. برای توسعه رابط کاربری (GUI)، از بستر نرم‌افزاری قدرتمند React استفاده شده که تجربه‌ای کاربرپسند و روان ارائه می‌دهد. در بخش سرور، زبان

References

- Alizadeh, Z. (2022). Real-time adaptive operation of dam reservoir systems under flood conditions. Ph.D. Dissertation, Supervised by Dr. Jafar Yazdi, Shahid Beheshti University.
- Avand, M., Moradi, H.R., & Ramazanzadeh Lasboyee, M. (2021). Spatial prediction of future flood risk: an approach to the effects of climate change. *Geosciences*. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010025>
- Bajracharya, S.R., Khanal, N.R., Nepal, P., Rai, S.K., Ghimire, P.K., & Pradhan, N.S. (2021). Community assessment of flood risks and early warning system in ratu watershed, Koshi basin, Nepal. *Sustainability*, 13(6), 3577. <https://doi.org/10.3390/su13063577>
- Brunner, G.W. (1995). HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual. Version 1.0.
- Byaruhanga, N., Kibirige, D., Gokool, S., & Mkhonta, G. (2024). Evolution of flood prediction and forecasting models for flood early warning systems: A scoping review. *Water*, 16(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w16131763>
- Chen, W., Wu, H., Kimball, J.S., Alfieri, L., Nanding, N., Li, X., & Zhong, W. (2022). A coupled river basin urban hydrological model (DRIVE Urban) for real-time urban flood modeling. *Water Resources Research*, 58(11), e2021WR031709. <https://doi.org/10.1029/2021wr031709>
- Cheong, T.S., Choi, C., Ye, S.J., Shin, J., Kim, S., & Koo, K.M. (2023). Development of flood early warning frameworks for small streams in Korea. *Water*, 15(10), 1808. <https://doi.org/10.3390/w15101808>
- DHI. (2017). MIKE FLOOD: User Guide. DHI Water & Environment.
- Falck, A., Tomasella, J., & Papa, F. (2021). Assessing the potential of upcoming satellite altimeter missions in operational flood forecasting systems. *Remote Sensing*, 13(21), 4459. <https://doi.org/10.3390/rs13214459>
- GeoServer Project. (2024). GeoServer User Manual. Retrieved from <https://docs.geoserver.org>
- Ghahraman, K., Nagy, B., & Nooshin Nokhandan, F. (2023). Flood-prone zones of meandering rivers: Machine learning approach and considering the role of morphology (Kashkan River, Western Iran). *Geosciences*, 13(9), 267. <https://doi.org/10.3390/geosciences13090267>
- Jafarzadegan, K., Moradkhani, H., Pappenberger, F., Moftakhari, H., Bates, P., Abbaszadeh, P., & Duan, Q. (2023). Recent advances and new frontiers in riverine and coastal flood modeling. *Reviews of Geophysics*, 61(2), e2022RG000788. <https://doi.org/10.1029/2022rg000788>
- Kalimisetty, S., Singh, A., Korada Hari Venkata, D.R., & Mahmood, V. (2022). 1D and 2D model coupling approach for the development of operational spatial flood early warning system. *Geocarto International*, 37(15), 4390-4405. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886335>
- Karami, M., Abedi Koupai, J., & Gohari, S.A. (2024). Integration of SWAT, SDSM, AHP, and TOPSIS to detect flood-prone areas. *Natural Hazards*, 120(7), 6307-6325. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06483-7>
- Liu, Y., Wang, H., & Lei, X. (2021). Real-time forecasting of river water level in urban based on radar rainfall: A

- case study in Fuzhou City. *Journal of Hydrology*, 603, 126820. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126820>
16. Merino, A., García-Ortega, E., Navarro, A., Sánchez, J.L., & Tapiador, F.J. (2022). WRF hourly evaluation for extreme precipitation events. *Atmospheric Research*, 274, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106215>
17. Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V.P., Wright, D.B., Villarini, G., & Stedinger, J.R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(6), 03122001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002164](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002164)
18. Montgomery, D.R., Buffington, J.M., Smith, R.D., Schmidt, K.M., & Pess, G. (1995). Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, 31(4), 1097-1105.
19. Morshed, M.A., Mushwani, H., Sahak, K., & Hairan, M.H. (2024). The current state of early warning system in South Asia: A case study of Afghanistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104201>
20. Muñoz, P., Orellana-Alvear, J., Bendix, J., Feyen, J., & Céleri, R. (2021). Flood early warning systems using machine learning techniques: The case of the Tomebamba Catchment at the southern Andes of Ecuador. *Hydrology*, 8(4), 183. <https://doi.org/10.20944/preprints202111.0510.v1>
21. Nanda, T., Sahoo, B., Beria, H., & Chatterjee, C. (2016). A wavelet-based non-linear autoregressive with exogenous inputs (WNARX) dynamic neural network model for real-time flood forecasting using satellite-based rainfall products. *Journal of Hydrology*, 539, 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.014>
22. NCEP. (2020). NCEP GFS: NOAA's Global Forecast System. National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration.
23. Obe, R.O., & Hsu, L.S. (2015). *PostGIS in Action*, 2nd Edition. Manning Publications.
24. Patel, P., Thakur, P.K., Aggarwal, S.P., Garg, V., Dhote, P.R., Nikam, B.R., & Al-Ansari, N. (2022). Revisiting 2013 Uttarakhand flash floods through hydrological evaluation of precipitation data sources and morphometric prioritization. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 646-666. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2038696>
25. Ren, D.F., & Cao, A.H. (2023). Precipitation-runoff simulation in Xiushui river basin using HEC-HMS hydrological model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2845-2856. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01679-x>
26. SCS. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
27. SCS. (1986). Urban hydrology for small watersheds (TR-55). Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
28. Shaikh, A.A., Pathan, A.I., Waikhom, S.I., Agnihotri, P.G., Islam, M.N., & Singh, S.K. (2023). Application of latest HEC-RAS version 6 for 2D hydrodynamic modeling through GIS framework: a case study from coastal urban floodplain in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 1369-1385. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01567-4>
29. USACE-HEC. (2018). HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual, Version 4.3. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
30. Zang, Y., Meng, Y., Guan, X., Lv, H., & Yan, D. (2022). Study on urban flood early warning system considering flood loss. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103042>

Spatial Prediction of Gully Erosion Susceptibility in the Talwar Watershed of Kurdistan Province Using Random Forest and Boosted Regression Trees Models and Evaluating their Accuracy

O. Rahmati^{1*}, S.M. Soleimanpour², S. Shadfar³, S. Zahedi¹

1- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran (*- Corresponding Author Email: o.rahmati@areeo.ac.ir)

2- Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

3- Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 12 February 2025

Revised: 01 July 2025

Accepted: 14 July 2025

Available Online: 14 July 2025

How to cite this article:

Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Shadfar, S., & Zahedi, S. (2025). Spatial prediction of gully erosion susceptibility in the Talwar watershed of Kurdistan province using random forest and boosted regression trees models and evaluating their accuracy. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 243-258. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92149.1465>

Introduction

Gully erosion is one of the most important factors affecting sediment production and land degradation, and predicting its occurrence is one of the practical solutions to prevent gully erosion. Since the occurrence of gully erosion is directly related to environmental factors and human activities, it is possible to identify areas prone to gully erosion using models based on artificial intelligence and data mining. Modeling helps to save time and cost of measuring gutters. Also, because artificial intelligence and data mining models have a high ability to analyze environmental information; they are able to identify nonlinear and complex relationships between variables, and for this reason, they have been widely accepted by researchers in various sciences worldwide. For this purpose, this study aimed to predict gully erosion susceptibility using random forest models and boosted regression trees in the Talwar watershed located in the southeast of Kurdistan province.

Materials and Methods

Initially, 99 gullies were identified during field visits, the location of the gully head-cut was recorded, and a map of the spatial distribution of the gullies was prepared. The recorded gullies were randomly divided into two groups: training and validation in a ratio of 70:30, such that 70% of the gullies were in the training group and the rest in the validation group. In addition, maps of factors affecting gully erosion including elevation, slope gradient, slope aspect, lithology, distance from the stream, topographic wetness index, land use, plan curvature, profile curvature, average annual rainfall, relative slope position, stream power index, distance from the road, soil order, and soil texture were prepared in geographic information system. Subsequently, in the modeling process, environmental factors were considered as independent variables and the creation of gullies as a dependent variable. In order to model gully erosion, the training group gullies were used in this stage to calibrate the models. In this study, Random Forest (RF) and Boosted Regression Trees (BRT) machine learning models were used to predict gully erosion. In these models, raster layers related to environmental factors affecting gully erosion were



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92149.1465>

introduced as independent variables to the model. Also, the layer of gully front points, which were previously named after the training group, was introduced as a dependent variable to the model. The process of running the models was carried out in the R software environment. The prediction accuracy of the models was also evaluated using the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) method.

Results and Discussion

The spatial pattern of gully erosion by these two models showed that in this basin, generally the middle, eastern and northern parts, which are adjacent to waterways and rivers, had a higher tendency to cause gully erosion. Since the prediction interval of gully erosion in artificial intelligence models varied between zero and one, it can be considered as the probability of gully erosion. The lowest and highest values of the probability of gully erosion by the random forest model were obtained as 0.006 and 0.996, respectively. The median value of the prediction of gully erosion in the prediction of the random forest model was also calculated as 0.322. Therefore, 50% of the pixels in this basin had a tendency to cause gully erosion greater than 0.322 and the other half of its tendency was less than 0.322. The spatial pattern of gully erosion prediction from the boosted regression tree model also varied from 0.011 to 0.799. This model generally introduced the adjacent sections of the drainage network in the middle, eastern, and northern parts as the most favorable lands for the creation and formation of gully erosion. The median predicted value from this model was 0.387. Prediction accuracy, measured by the area under the receiver operating characteristic curve, was 0.952 for the random forest model and 0.891 for the boosted regression tree model.

Conclusion

The findings showed that the random forest model had more accuracy in spatial prediction of gully erosion in the Talwar watershed. Also, based on the AUC criterion, the random forest model was placed in the excellent group ($AUC > 0.9$) and the boosted regression tree model was placed in the very good group ($AUC < 0.8$). According to the findings of this study, executive agencies can use artificial intelligence and data mining models, such as the random forest model, to prepare a gully erosion map and plan and prioritize areas for implementing soil conservation measures. Certainly, focusing soil conservation executive measures and management programs in areas prone to gully erosion in the country's watersheds will improve the performance and optimize the financial resources of natural resources and watershed management departments.

Keywords: Artificial intelligence, Modeling, Soil conservation, Spatial pattern

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۴، ص. ۲۴۳-۲۵۸

پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و ارزیابی دقت آن‌ها

امید رحمتی^{۱*} - سید مسعود سلیمان‌پور^۲ - صمد شادفر^۲ - صلاح‌الدین زاهدی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

چکیده

فرسایش خندقی به‌عنوان یکی از عوامل تخریب سرزمین شناخته شده و اثرات زیان‌باری در محل و همچنین مناطق پایین‌دست حوزه آبخیز به بار می‌آورد. به‌دلیل دشوار بودن کنترل توسعه فرسایش‌های خندقی، شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی و جلوگیری از تشکیل آن از اهمیت زیادی برخوردار است. این پژوهش با هدف پیش‌بینی مکانی استعداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان انجام شده است. در ابتدا ۹۹ خندق در بازدیدهای میدانی تشخیص داده شد و موقعیت پیشانی خندق‌ها ثبت و نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها تهیه شد. خندق‌ها به‌صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی به نسبت ۷۰:۳۰ تقسیم شدند. همچنین نقشه عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحنا سطح، انحنا مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان، فاصله از جاده، رده و بافت خاک در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. مقدار احتمال ایجاد فرسایش خندقی توسط مدل جنگل تصادفی بین ۰/۰۰۶ تا ۰/۹۹۶ و توسط مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۷۹۹ به‌دست آمد. خروجی الگوی مکانی ایجاد فرسایش خندقی توسط این دو مدل نشان داد بخش‌های میانی، شرقی و شمالی این حوضه که در مجاورت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها هستند، از استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتری برخوردار هستند. میزان دقت پیش‌بینی مدل‌ها بر اساس روش مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شد. بر این اساس، مقدار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده در مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده به‌ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۸۹۱ به‌دست آمد. بنابراین مدل جنگل تصادفی دقت بیشتری در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی نشان داد. به این سبب، استفاده از مدل هوش مصنوعی جنگل تصادفی در مدیریت سرزمین و برنامه‌های حفاظت خاک حوزه‌های آبخیز مستعد ایجاد فرسایش خندقی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الگوی مکانی، حفاظت خاک، مدل‌سازی، هوش مصنوعی

مقدمه

مختلف کشور در معرض خطر ایجاد فرسایش خندقی هستند. هر ساله خسارت‌های زیادی در اثر ایجاد فرسایش خندقی به‌بار می‌آید. علاوه بر اثرات در محل فرسایش خندقی، خندق‌ها رسوبات زیادی را برای مناطق پایین‌دست تولید می‌کنند که اکوسیستم‌های آبی مناطق پایین‌دست اعم از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تأسیسات پرورش ماهی و مخازن سدها را با مشکل مواجه می‌کند (Refahi, 2017).

ایجاد و گسترش فرسایش خندقی موجب افزایش ناپایداری و تخریب سرزمین می‌شود (Igwe, Chinedu, Nlem, Nwezi, & Ezekwu, 2018). در حال حاضر بسیاری از اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی روستایی، تأسیسات و جاده‌های احداث‌شده در استان‌های

۱- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنجند، ایران
(*) نویسنده مسئول (Email: o.rahmati@areeo.ac.ir)

۲- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

۳- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

از آنجایی که ایجاد فرسایش خندقی ارتباط مستقیمی با عوامل محیطی و فعالیت‌های انسانی دارد، می‌توان با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و داده‌کاوی، مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی را شناسایی کرد. مدل‌سازی کمک می‌کند تا در زمان و هزینه اندازه‌گیری خندق‌ها صرفه‌جویی شود. همچنین به دلیل این که مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی، قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل اطلاعات محیطی دارند؛ قادرند روابط غیرخطی و پیچیده بین متغیرها را شناسایی کنند و به همین سبب، مورد اقبال عمومی پژوهشگران علوم مختلف در سطح جهان قرار گرفته‌اند (Rahmati, Soleimanpour, Shadfar, & Zahedi, 2023). اما یکی از مشکلات موجود در زمینه استفاده از این مدل‌ها، نبود اطلاعات ثبت شده مربوط به ایجاد فرسایش خندقی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور است. از طرفی دیگر، ممکن است منطقه‌ای مستعد ایجاد فرسایش خندقی باشد اما تاکنون شرایط به حد آستانه نرسیده و یا این که فرسایش خندقی در بدو وقوع باشد که براساس اصول حفاظت خاک بایستی این مناطق قبل از ایجاد فرسایش خندقی مدیریت شوند.

در پژوهش‌های مختلفی از مدل‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی در مطالعات فرسایش خندقی استفاده شده است. به عنوان مثال، کانوسنتی و همکاران (Conoscenti et al., 2014) با استفاده از رگرسیون لجستیک به مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی پرداختند. در این پژوهش، ۲۷ متغیر محیطی به عنوان عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد علی‌رغم وجود فرض‌های آماری برای مدل رگرسیون لجستیک، این مدل دقت مناسبی در پیش‌بینی مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی دارد. جورچسکو و گرکو (Jurchescu & Grecu, 2015) نیز برای مدل‌سازی مکانی مناطق مستعد وقوع فرسایش‌های خندقی منطقه اولت رومانی از مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی CART در دو مقیاس متفاوت منطقه‌ای (۱:۱۰۰۰۰۰ تا ۱:۲۰۰۰۰۰) و حدواسط (۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۵۰۰۰۰) استفاده کردند. نتایج نشان داد در حالتی که مطالعه با مقیاس منطقه‌ای انجام می‌گیرد، عوامل مختلفی بر روی عدم قطعیت نتایج تأثیر می‌گذارند و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند در بهبود دقت مکانی موقعیت خندق‌ها و در نتیجه افزایش دقت مدل درخت رگرسیون و طبقه‌بندی بسیار مفید باشد. همچنین، رحمتی و همکاران (Rahmati, Tahmasebipour, Haghizadeh, Pourghasemi, & Feizizadeh, 2017) کارایی مدل‌های یادگیری ماشینی مختلف از جمله ماشین بردار پشتیبان، درختان رگرسیونی تقویت شده و جنگل تصادفی در زمینه شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در منطقه پل دختر مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش دوازده عامل محیطی مختلف برای مدل سازی پدیده شکل‌گیری فرسایش خندقی انتخاب شد. همچنین، اندازه نمونه‌های آموزشی مختلف از پایگاه داده موقعیت رخداد‌های فرسایش

خندقی نیز مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده، مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (با کرنل تابع پایه شعاعی) بهترین عملکرد را از نظر دقت پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی داشتند و این مدل‌ها حساسیت کمتری نسبت به اندازه نمونه آموزشی داشتند. گروسی و همکاران (Garosi et al., 2018) نیز به بررسی اثر قدرت تفکیک مکانی و منبع تهیه لایه‌های محیطی بر کارایی مدل‌های هوش مصنوعی در زمینه پیش‌بینی رخداد فرسایش خندقی پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و درختان رگرسیونی تقویت شده عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره و مدل خطی تعمیم یافته داشتند. همچنین، گاین و همکاران (Gayen, Pourghasemi, Saha, Keesstra, & Bai, 2019) به منظور شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی، عملکرد مدل‌های تجزیه و تحلیل تفکیک انعطاف‌پذیر، خطوط رگرسیون افزودنی چند متغیره، جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان را باهم مقایسه کردند. در این مطالعه دوازده عامل محیطی مختلف و اثرگذار بر شکل‌گیری فرسایش خندقی در نظر گرفته شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بیش‌ترین دقت پیش‌بینی را به خود اختصاص داده است. در مطالعه‌ای دیگر، رحمتی و همکاران (Rahmati, Tahmasebipour, Haghizadeh, Pourghasemi, & Feizizadeh, 2019) کارایی مدل بیشینه آنتروپی در زمینه پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوزه آبخیز کشکان-پل دختر استان لرستان را ارزیابی نموده و نتایج نشان داد که این مدل قابلیت بالایی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی داشته است.

براساس مطالعه‌ی گروسی و همکاران (Garosi, Sheklabadi, Conoscenti, Pourghasemi, & Van Oost, 2019) در مطالعه استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی حوضه سد اکباتان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشینی مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش نیز نشان داد که مدل جنگل تصادفی، بهترین عملکرد را برای پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی داشته است. ویی و همکاران (Wei et al., 2022) نیز برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه‌ای از کشور چین، از مدل نسبت فراوانی، الگوریتم Boruta و جنگل تصادفی استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که میانگین بارندگی سالانه دارای بیش‌ترین اثرگذاری و بعد از آن عامل فرساینده‌ی باران و فاصله از جریان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی هستند. مدل‌سازی مکانی استعداد رخداد فرسایش خندقی انجام شده با استفاده از مدل جنگل تصادفی نیز مورد ارزیابی کمی قرار گرفت و دقت آن در تکرارهای مختلف ۹۶ تا ۹۹ درصد، به عنوان مناسب‌ترین مدل از نظر دقت پیش‌بینی معرفی شد. در پژوهشی دیگر، ور و همکاران (Were et al., 2023) به ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، درختان رگرسیونی تقویت‌شده، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک، در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در یک منطقه

تقویت‌شده و تولید نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی در این حوزه آبخیز، انجام شد.

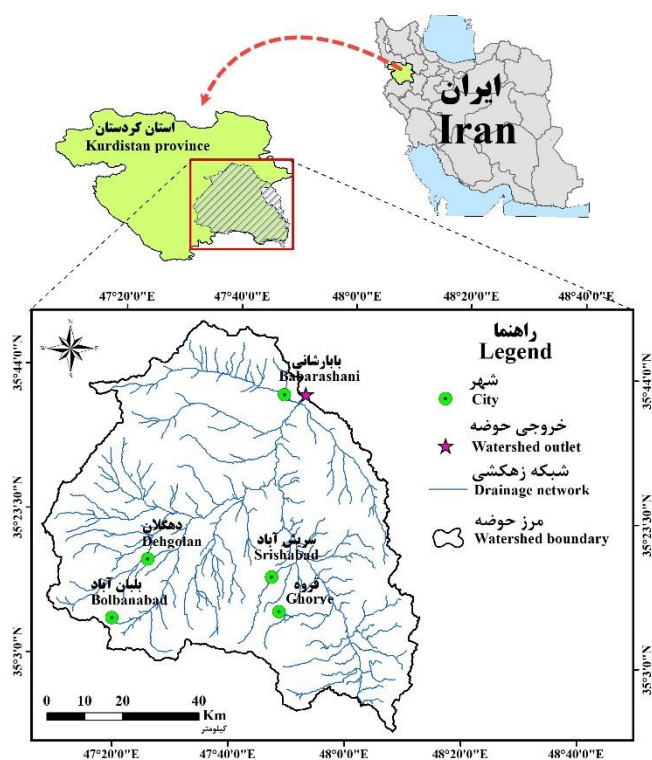
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تلوار، در محدوده مشترک بین استان‌های کردستان و همدان واقع شده است (۴۵ کیلومتری شهرستان بیجار) (شکل ۱). مساحت این حوضه $۶۴۶۸/۳$ کیلومتر مربع است. این حوضه حالت نسبتاً گرد داشته و شبکه زهکشی آن شاخه درختی است. یکی از دلایل ضروری بودن توجه به مسأله فرسایش خندقی این حوضه این است که سد تلوار در خروجی آن قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه حوضه ۲۵۶ میلی‌متر است. براساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک است. کاربری غالب منطقه متشکل از کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، باغات و مراتع است. از نظر سنگ‌شناسی، سازند کواترنری (نهشته‌های آبرفتی، رودخانه‌ای، رسوبات ریزدانه و مارن‌ها) بخش اعظم سنگ‌شناسی منطقه را تشکیل داده است (Rahmati et al., 2023).

نیمه‌خشک تخریب‌یافته در کشور کنیا اقدام کردند. در این پژوهش، از بررسی ۴۳۱ خندق، مطالعات میدانی و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا در گوگل‌ارث استفاده شد. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی، از دقت بالاتری در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی و مناطق مستعد برخورداری بود و پس از آن مدل‌های درختان رگرسیون تقویت‌شده، ماشین‌بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک قرار داشتند. به تازگی، باموو و همکاران (Bammou et al., 2024) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین اقدام به ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوزه آبریز تنسیفت واقع در کشور مراکش کردند. در این پژوهش، ۱۸ عامل مؤثر محیطی در مدل‌سازی استفاده شد و در نهایت، یافته‌ها نشان داد مدل‌های XGBoost و KNN، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها به‌منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی معرفی شدند و مدل‌های جنگل تصادفی، ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

با درنظر گرفتن فواید به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین در مطالعات فرسایش خندقی و همچنین مشخص نبودن مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان، این پژوهش با هدف مقایسه کارایی مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیای حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

Figure 1- Geographical location map of the Talwar watershed in Kurdistan province

مواد و روش‌ها

ثبت موقعیت مکانی رخدادهای فرسایش خندقی

در بازدیدهای میدانی، ۹۹ خندق موجود در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان شناسایی شدند و موقعیت پیشانی آن‌ها با استفاده از دستگاه GPS و تصاویر گوگل ارث ثبت شد. سپس، نقشه پراکنش مکانی خندق‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی (نرم‌افزار ArcGIS 10.3) تهیه شد. از آنجایی که وقوع خندق‌ها تحت تأثیر دیگر عوامل محیطی است. در مدل‌سازی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی، موقعیت مکانی پیشانی خندق‌ها (به صورت نقطه‌ای) به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. سپس این داده‌ها به صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شدند به گونه‌ای که گروه آموزش شامل ۷۰ درصد داده‌ها و گروه اعتبارسنجی شامل ۳۰ درصد داده‌ها بود. داده‌های گروه آموزش در مراحل ساخت، واسنجی و بهینه‌سازی مدل‌های هوش مصنوعی استفاده شد و داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله نهایی و پس از ارائه پیش‌بینی‌ها، به منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی

در ادامه نسبت به انتخاب متغیرهای محیطی اثرگذار بر ایجاد فرسایش خندقی اقدام شد. فرسایش خندقی یک فرایند زمین‌ریخت‌شناسی پیچیده است که عوامل محیطی مختلفی در شکل‌گیری آن نقش دارند. فرسایش خندقی در اثر دو فرایند مجزا می‌تواند به وجود آید. توسعه شیارها در اثر تنش برشی جریان‌های سطحی می‌تواند منجر به تشکیل فرسایش خندقی شود؛ از این رو در برخی منابع علمی به نام آب‌کند مطرح شده است (Soleimanpour, Soufi, & Ahmadi, 2009; Soleimani, Soufi, & Arsham, 2017). همچنین، فرسایش خندقی می‌تواند در اثر توسعه فرسایش تونلی (لانه‌روباهی) به وجود آید (Servati, Ghodosi, & Dadkhah, 2008). به همین دلیل پیش‌بینی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی نیازمند طیف وسیعی از متغیرهای محیطی است (Rahmati, Soleimanpour, & Shadfar, 2024). براساس مرور منابع انجام شده در زمینه شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین عوامل مؤثر بر وقوع آن (Emadodin, Omid, Arekhi, & Karam, 2021; Rangzan, Zaheri Abdehvand, & Mokarram, 2022; Shahabi, Amiri, & Shirzadi, 2022; Asadi Nalivan et al., 2023; Javidan, Kaviani, Rajabi, Pourghasemi, & Jafarian, 2023; Zakerinejad & Alvandi, 2023; Vosoghi, Zakerinejad, & Entezari, 2024)، ۱۵ متغیر محیطی شامل:

ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، کاربری اراضی، انحنا^۲ سطح، انحنا^۳ مقطع، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی^۴ (RSP)، شاخص توان جریان^۵ (SPI)، فاصله از جاده، رده خاک و بافت خاک به عنوان متغیرهای اثرگذار در ایجاد فرسایش خندقی انتخاب شدند. این متغیرها در مدل‌سازی نقش پیش‌بینی‌کننده ایجاد فرسایش خندقی را خواهند داشت. شایان ذکر است که مدل‌های یادگیری ماشینی قادر هستند که از متغیرهای کمی (مانند ارتفاع، درجه شیب، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، میانگین بارندگی سالانه، موقعیت شیب نسبی، شاخص توان جریان و فاصله از جاده) و کیفی (مانند جهت شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، انحنا^۲ سطح، انحنا^۳ مقطع، رده خاک و بافت خاک) برای پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی استفاده نمایند (Ghorbanzadeh et al., 2020). لایه رستری تمام متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در محیط ArcGIS 10.2 و SAGA-GIS با اندازه پیکسل ۳۰ متر و مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه رستری ارتفاع منطقه نیز از لایه مدل رقومی ارتفاع (قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) تهیه شد. لایه‌های شیب زمین، جهت شیب و انحنا^۲ سطح با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع ساخته شد. لایه سنگ‌شناسی منطقه با استفاده از زمین مرجع‌سازی و رقومی‌سازی نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه تهیه شد. لایه رستری متوسط بارندگی سالانه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان و روش‌های درون‌یابی مختلف تهیه شد. از آنجایی که ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای در مناطق غیرشهری و ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده نزدیک شهرها قرار گرفته‌اند، استفاده همزمان از داده‌های بارندگی ثبت شده موجب افزایش دقت نقشه متوسط بارندگی سالانه می‌شود. در این پژوهش، از داده‌های شش ایستگاه‌های باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان شامل چنگیزقلعه، حسن‌خان، دهگلان، سلامت‌آباد، قروه و نورمحمدکندی و پنج ایستگاه‌های باران‌سنجی اداره کل هواشناسی استان کردستان شامل دهگلان، قروه، سنندج، یاسوئند و دیواندره استفاده شده است. در این مرحله، دقت روش‌های مختلف درون‌یابی (مانند روش وزنی عکس فاصله و کریجینگ) برای تهیه لایه رستری میانگین بارندگی سالانه مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت روشی که دارای کم‌ترین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) است، به عنوان روش مناسب استفاده شد. اگرچه عامل شدت بارندگی برای پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش مناسب‌تر است، به دلیل نبود ایستگاه

5- Stream power index

1- Topographic wetness index
2- Plan curvature
3- Profile curvature
4- Relative slope position

بافت خاک دریافت شده از سامانه گوگل‌ارث‌انجین برای حوزه آبخیز مورد مطالعه است. تمامی لایه‌های مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده استانداردسازی شد تا دامنه تغییرات متغیرها یکسان شود. قبل از ورود لایه‌های متغیرهای مستقل به مدل، آزمون هم‌خطی‌چندگانه^۳ انجام شده تا از عدم وجود همبستگی بین متغیرها اطمینان حاصل گردد. بدین منظور از آماره عامل تحمل^۴ (TOL) استفاده شده و هنگامی که مقدار این آماره بیشتر از ۰/۱ باشد، هم‌خطی‌چندگانه بین متغیرهای مستقل مشاهده نشده است (Ghorbanzadeh et al., 2020). در این پژوهش، مقدار آماره عامل تحمل برای عوامل محیطی منتخب در نرم‌افزار R بیشتر از ۰/۱ به دست آمده و از اینرو امکان ورود متغیرهای مستقل در فرایند مدل‌سازی فراهم شد.

مدل‌سازی استعداد فرسایش خندقی

در ادامه و در فرایند مدل‌سازی، عوامل محیطی به‌عنوان متغیرهای مستقل و ایجاد خندق‌ها به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. به‌منظور مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی، خندق‌های گروه آموزش در این مرحله برای واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. در مرحله نخست مدل‌سازی، لایه موقعیت پیشانی خندق‌های گروه آموزش و لایه‌های رستری مربوط به متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، روی هم‌گذاری شدند. سپس ارزش پیکسل‌های عوامل محیطی متناظر با ایجاد هر یک از فرسایش‌های خندقی تعیین و بر این اساس، روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته برآورد شد و نهایتاً ایجاد فرسایش خندقی پیش‌بینی شد. اندازه پیکسل نقشه ایجاد فرسایش خندقی نیز با لایه‌های رستری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (۳۰ متر) برابر در نظر گرفته شد. در این پژوهش، مدل‌های یادگیری ماشینی جنگل تصادفی (RF) و درختان رگرسیونی تقویت‌شده (BRT) برای پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی استفاده شد. در این مدل‌ها، لایه‌های رستری مربوط به عوامل محیطی مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی به‌عنوان متغیرهای مستقل به مدل معرفی شدند. همچنین لایه نقاط پیشانی خندق‌ها که قبلاً به نام گروه آموزشی نام‌گذاری شده بودند، به‌عنوان متغیر وابسته به مدل معرفی شدند. فرایند اجرای مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد. پس از فرایند پردازش مدل‌ها، رابطه میان متغیرها توسط مدل‌های فوق‌الذکر شناسایی شد. این مدل‌ها قادر هستند که احتمال وقوع فرسایش خندقی را برای هر پیکسل پیش‌بینی کنند.

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده

پس از تهیه نقشه پیش‌بینی هریک از مدل‌ها، میزان صحت پیش‌بینی آن‌ها براساس لایه نقاط پیشانی خندق‌ها، گروه اعتبارسنجی مورد

های باران‌نگار در منطقه، امکان دستیابی به داده‌های شدت بارندگی سال‌های گذشته وجود ندارد. نقشه کاربری اراضی حوزه تلوار با استفاده از تصاویر گوگل‌ارث تهیه شد. از آنجایی که تجمع جریان‌های سطحی نقش مهمی در فرایند کنش و شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی دارند، بخش‌های مجاور آبراهه‌ها و رودخانه‌ها پتانسیل بالاتری برای تشکیل و رشد فرسایش‌های خندقی دارند. نقشه فاصله از جریان‌های سطحی نیز در همین نرم‌افزار با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی^۱ در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. این نقشه دارای ساختار رستری بوده و ارزش هر پیکسل، میزان فاصله آن پیکسل از نزدیک‌ترین جریان سطحی را نشان می‌دهد و در مطالعات تعیین استعداد رخداد فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Conoscenti, Agnesi, Cama, Caraballo-Arias, & Rotigliano, 2018). شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از دو لایه رستری مساحت بالادست (مساحت مشارکت‌کننده در تولید رواناب) و شیب در نرم‌افزار SAGA-GIS ساخته شد. جاده‌ها به دو صورت در فرایند شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی مشارکت دارند. سطح نفوذناپذیر جاده‌ها موجب تجمع جریان‌های سطحی شده و در برخی مواقع فرسایش خندقی در حاشیه جاده و به موازات آن تشکیل می‌گردد. از سویی دیگر، جریان خروجی زیرگذر جاده‌ها نیز خروج شدید آب و تشکیل آبشار در پایین‌دست زیرگذر را به دنبال داشته که شرایط مناسب برای تشکیل فرسایش خندقی را به وجود می‌آورد. از اینرو فاصله از جاده به‌عنوان یکی از عوامل اصلی در مطالعات شکل‌گیری فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Nyssen et al., 2002). پس از استخراج موقعیت مکانی جاده‌های منطقه از تصاویر گوگل‌ارث، نقشه فاصله از جاده نیز با ابزار فاصله اقلیدسی در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تهیه شد. نقشه رده خاک براساس اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان تهیه شد. نقشه بافت خاک با استفاده از داده‌های خاک (پایگاه داده جهانی خاک) سامانه گوگل‌ارث‌انجین تهیه شد. اندازه پیکسل نقشه بافت خاک سامانه گوگل‌ارث‌انجین ۲۵۰ متر است که با استفاده از ابزار Resample در نرم‌افزار ArcGIS به اندازه پیکسل ۳۰ متر تبدیل شد تا امکان پردازش داده‌ها توسط مدل فراهم شود. به‌منظور اطمینان از نقشه بافت خاک تهیه شده در این پژوهش، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا سی سانتی‌متری برداشت شد و به آزمایشگاه خاک‌شناسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان منتقل شد. کلاس بافت خاک نمونه‌ها به روش هیدرومتری تعیین و با نقشه بافت خاک حاصل از سامانه گوگل‌ارث-انجین مقایسه شد. معیار ارزیابی دقت کلی^۲ (OA) برای نقشه بافت خاک ۹۵/۵۶ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دقت مناسب نقشه

3- Multicollinearity

4- Tolerance

1- Euclidean distance

2- Overall accuracy

شکل ۲ نشان داده شده است. اغلب خندق‌ها در بخش مرکزی، شمالی و شرقی حوزه آبخیز مورد مطالعه مشاهده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تراکم رخدادهای فرسایش خندقی در سراسر حوزه آبخیز تلوار یکسان نیست.

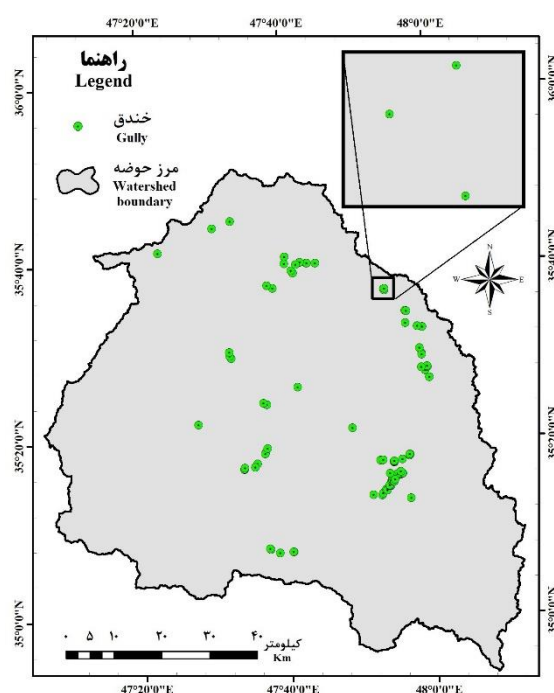
نقشه ۱۵ عامل محیطی در نظر گرفته شده به منظور مدل‌سازی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در شکل ۳ ارائه شده است. این عوامل عبارتند از: ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنا سطح، انحنا مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده. ارتفاع زمین در این منطقه از ۱۶۱۲ تا ۳۱۸۴ متر متغیر بوده و روند تغییر ارتفاع زمین از جنوب به شمال منطقه کاهشی است. با توجه به وجود ناهمواری زیاد در بخش‌های مختلف این حوزه آبخیز، نه کلاس مختلف جهت شیب شامل شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غربی، شمال غربی و بدون جهت شناسایی شده است.

ارزیابی قرار گرفت (Amiri, Pourghasemi, Ghanbarian, & Afzali, 2020). به این صورت که نتایج حاصل از مدل‌سازی ایجاد فرسایش خندقی، براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌های موقعیت خندق‌ها) و روش مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) ارزیابی شد (Rahmati et al., 2019). از آنجایی که داده‌های گروه اعتبارسنجی در مرحله مدل‌سازی به کار گرفته نشدند، لذا بررسی میزان صحت پیش‌بینی ایجاد خندق براساس آن‌ها (گروه اعتبارسنجی) به طور علمی و منطقی فراهم شد. پس از تعیین میزان صحت دو مدل مورد استفاده در این پژوهش، شرایط برای مقایسه کمی مدل‌ها و تعیین مدل برتر امکان‌پذیر شد. در صورتی که صحت مدل بالاتر از هفتاد درصد باشد، صحت مدل به عنوان قابل قبول شناخته می‌شود. مقادیر صحت بیش از هفتاد درصد نیز قابل گروه‌بندی است: خوب (صحت بین هفتاد تا هشتاد درصد)، خیلی خوب (صحت بین هشتاد تا نود درصد) و عالی (صحت بیش از نود درصد) (Saha, Roy, Arabameri, Blaschke, & Tien Bui, 2020).

نتایج

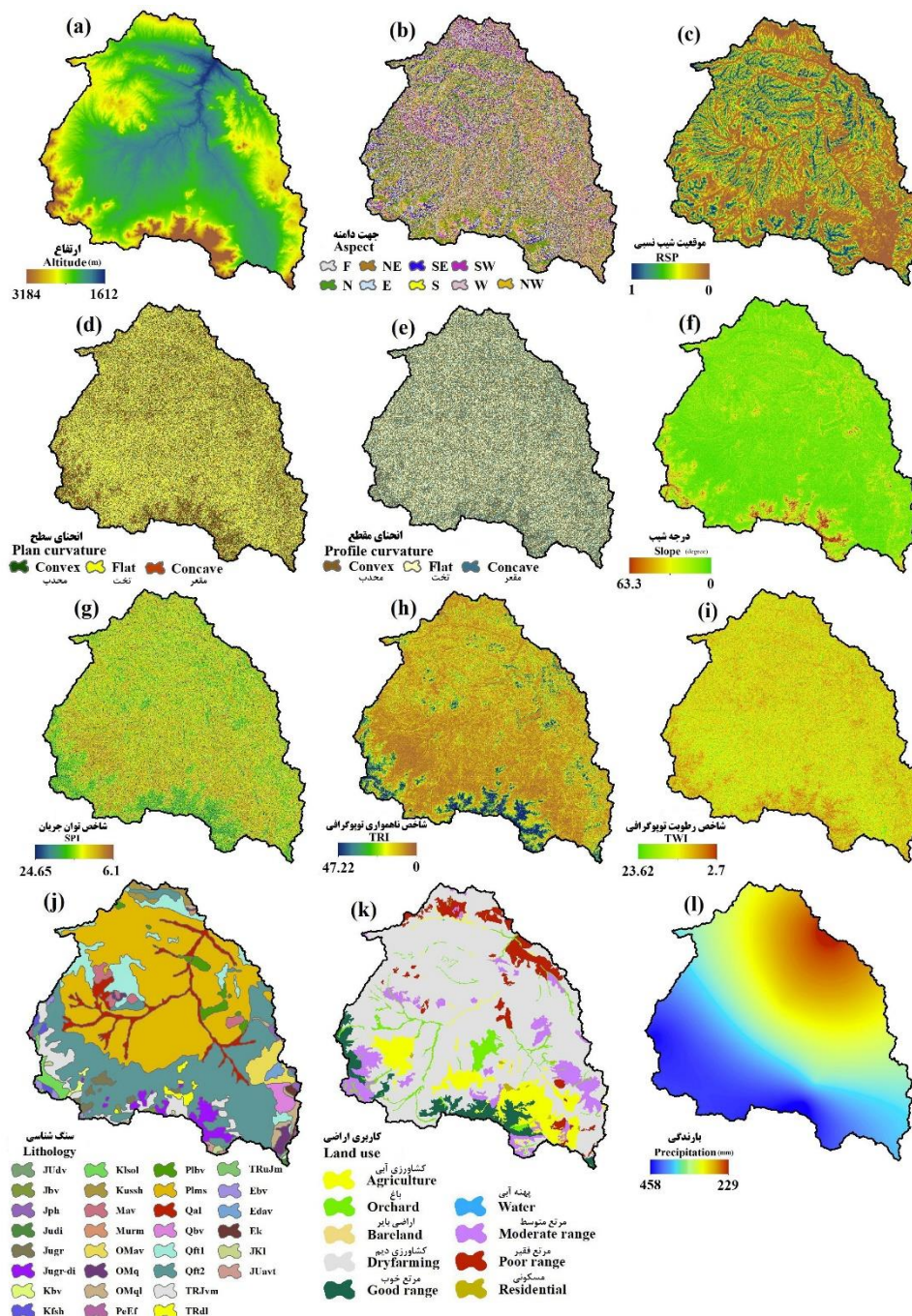
نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی

پراکنش خندق‌های موجود در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان در



شکل ۲- نقشه پراکنش خندق‌های واقع در حوزه آبخیز مورد مطالعه

Figure 2- Spatial distribution map of gullies in the studied watershed

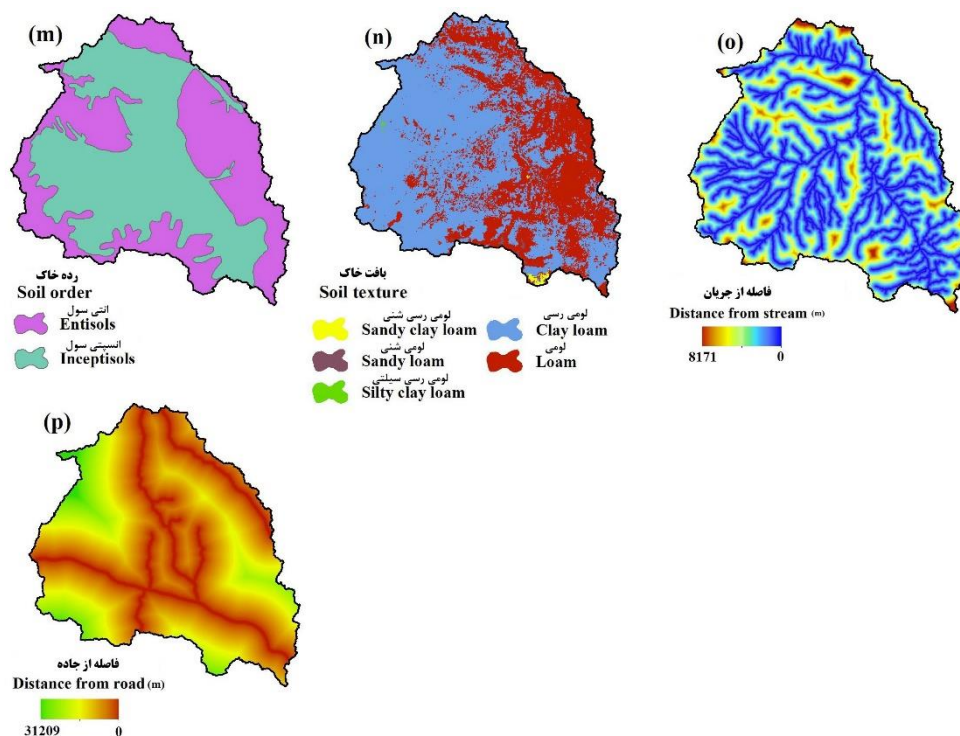


شکل ۳- نقشه عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

(به ترتیب از چپ به راست): نقشه‌های ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحناى سطح، انحناى مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده.

Figure 3- Maps of gully-induced factors in the Talwar watershed

(From left to right): altitude, slope aspect, relative slope position, plan curvature, profile curvature, slope gradient, stream power index, topographic roughness index, topographic wetness index, lithology, land use, precipitation, soil order, soil texture, distance from stream, and distance from road.



شکل ۳ (ادامه) - نقشه عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

(به ترتیب از چپ به راست): نقشه‌های ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنا سطح، انحنا مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده.

Figure 3 (continued)- Maps of gully-induced factors in the Talwar watershed

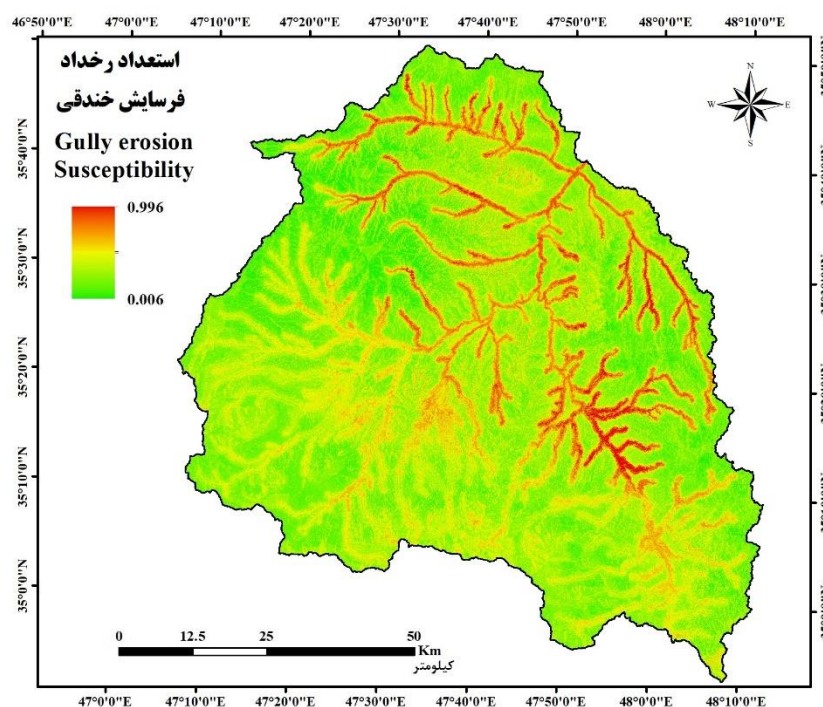
(From left to right): altitude, slope aspect, relative slope position, plan curvature, profile curvature, slope gradient, stream power index, topographic roughness index, topographic wetness index, lithology, land use, precipitation, soil order, soil texture, distance from stream, and distance from road.

مقطع، دامنه مقعر هستند، جریان زیرقشری تشکیل شده و شرایط زمینی برای فرایندهای خندق و زمین لغزش فراهم می‌گردد در حالی که در دامنه محدب فرآیند ریزش بیشتر مشاهده می‌شود. نقشه درجه شیب زمین در این منطقه نشان داد که مقدار شیب زمین از صفر تا ۶۳ درجه متغیر است. زمین‌های شیبدار عموماً در قسمت جنوبی قرار گرفته و برخی از بخش‌های داخلی نیز از شیب زیادی برخوردارند. شاخص توان جریان (SPI) نیز در این حوزه آبخیز از ۶/۱ تا ۲۴/۶۵ متغیر است. براساس نتایج به دست آمده، آبراهه‌هایی که در قسمت‌های جنوبی این حوزه آبخیز قرار دارند، بیشترین مقدار شاخص توان جریان را به خود اختصاص داده‌اند. دلیل این امر وجود شیب بستر زیاد در آبراهه‌های قسمت‌های جنوبی این منطقه است. شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) در این حوزه آبخیز از صفر تا ۴۷/۲۲ متغیر است. این شاخص که نشان‌دهنده میزان ناهمواری زمین است، نشان داد که بخش‌های جنوبی و جنوب غربی دارای بیشترین میزان ناهمواری هستند. این درحالی است که قسمت‌های شمالی و شمال شرقی حوزه آبخیز تلوار از کمترین ناهمواری برخوردارند. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نیز نشان داد که مقدار این شاخص در

شاخص موقعیت شیب نسبی (RSP) یک شاخص زمین ریخت‌شناسی است که مقدار آن در این حوزه آبخیز بین صفر تا یک متغیر است. شاخص موقعیت شیب نسبی بیانگر موقعیت یک نقطه (یا پیکسل) در یک دامنه است. نقاطی که دارای شاخص موقعیت شیب نسبی نزدیک به یک هستند، در قسمت قله (بال) دامنه قرار دارند در حالی که مقادیر نزدیک به صفر این شاخص بیانگر موقعیت پیکسل در پای دامنه است. مقادیر نزدیک به ۰/۵ در شاخص موقعیت شیب نسبی نشان‌دهنده قرارگیری پیکسل در حدوسط دامنه است. حوزه آبخیز تلوار از نظر شاخص موقعیت شیب نسبی متنوع است. از نظر انحنا سطح، دامنه‌های حوزه آبخیز مورد مطالعه به سه کلاس محدب، تخت و مقعر تقسیم شده‌اند. متغیر انحنا سطح وضعیت انحنا یک دامنه را از زاویه دید عمودی نشان می‌دهد و براساس آن می‌توان همگرایی یا واگرایی جریان در یک محدوده را تشخیص داد. از نظر انحنا مقطع، یک دامنه از زاویه دید جانبی به سه کلاس مختلف دامنه محدب، دامنه تخت و دامنه مقعر قابل کلاس‌بندی است. در حوزه آبخیز تلوار، تمامی دامنه‌ها با استفاده از متغیر انحنا مقطع به سه کلاس دامنه محدب، دامنه تخت و دامنه مقعر تقسیم شدند. محدوده‌هایی که از نظر متغیر انحنا

که رده خاک اینسپتی‌سولز بیشتر در قسمت‌های میانی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که در این حوزه آبخیز پنج کلاس بافت خاک شامل لوم رسی شنی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی و لومی وجود دارند. بیشترین سطح این منطقه توسط کلاس‌های بافت خاک لومی و لومی رسی پوشیده شده است. نقشه فاصله از جریان در این حوزه آبخیز نیز نشان داد که فاصله هر نقطه تا نزدیکترین آبراهه بین صفر تا ۸۱۷۱ متر متغیر است. احتمال شکل‌گیری فرسایش خندقی در اراضی نزدیک به آبراهه‌ها که جریان‌های سطحی و زیرسطحی بیشتری نسبت به اراضی دور از شبکه زهکشی دارند، بیشتر است. نقشه فاصله از جاده نیز نشان داد که جاده‌های متعددی در این حوزه آبخیز در قسمت‌های جنوبی، میانی و شمال غربی وجود دارد. جاده‌ها به دو روش بر شکل‌گیری فرسایش خندقی تأثیر می‌گذارند. تجمع رواناب‌ها در سطح جاده‌ها و ایجاد جریان آب در کنارگذر جاده‌ها موجب شکل‌گیری فرسایش خندقی در حاشیه جاده‌ها می‌شود. همچنین، خروج شدید جریان آب در زیرگذر جاده‌ها دارای انرژی کنشی زیادی بوده و شرایط را برای تشکیل خندق در پایین‌دست زیرگذر جاده‌ها فراهم می‌کند.

بخش‌های شمالی این حوزه آبخیز بیشتر از بخش‌های جنوبی است. از آنجایی که در بخش شمالی حوزه آبخیز شیب رودخانه‌ها کم و جریان آب زیاد است، شاخص رطوبت توپوگرافی در بخش شمالی بیشتر از بخش‌های دیگر است. حوزه آبخیز تلوار از نظر سنگ‌شناسی متنوع بوده و ۳۰ واحد سنگ‌شناسی در این حوزه آبخیز شناسایی شده است. براساس نقشه کاربری زمین، ۹ کلاس کاربری زمین در این حوزه آبخیز شناسایی شده است. نقشه کاربری زمین نشان داد که شیوه‌های مختلف استفاده و مدیریت زمین در این حوزه آبخیز متنوع است. براساس نتایج به دست آمده، میزان بارندگی حوزه آبخیز تلوار از ۲۲۹ تا ۴۵۸ میلی‌متر متغیر است که بیانگر تغییرات مکانی بسیار زیاد در این منطقه است. روند تغییرات مکانی میانگین بارندگی سالانه از قسمت جنوب غربی این حوزه آبخیز به سمت شمال شرقی کاهشی است. براساس روش طبقه‌بندی رده خاک سازمان کشاورزی ایالات متحده آمریکا (USDA)، در حوزه آبخیز تلوار دو رده خاک شامل انتی‌سولز و اینسپتی‌سولز شناسایی شده است (Ghaderi, Ghodosi, Tabatabai, & Khaledian, 2000). همانگونه که در نقشه رده خاک قابل مشاهده است، رده انتی‌سولز عموماً در مناطق حاشیه‌ای حوزه آبخیز تلوار که از نظر توپوگرافی ناهموار هستند، قرار دارد. این در حالی است



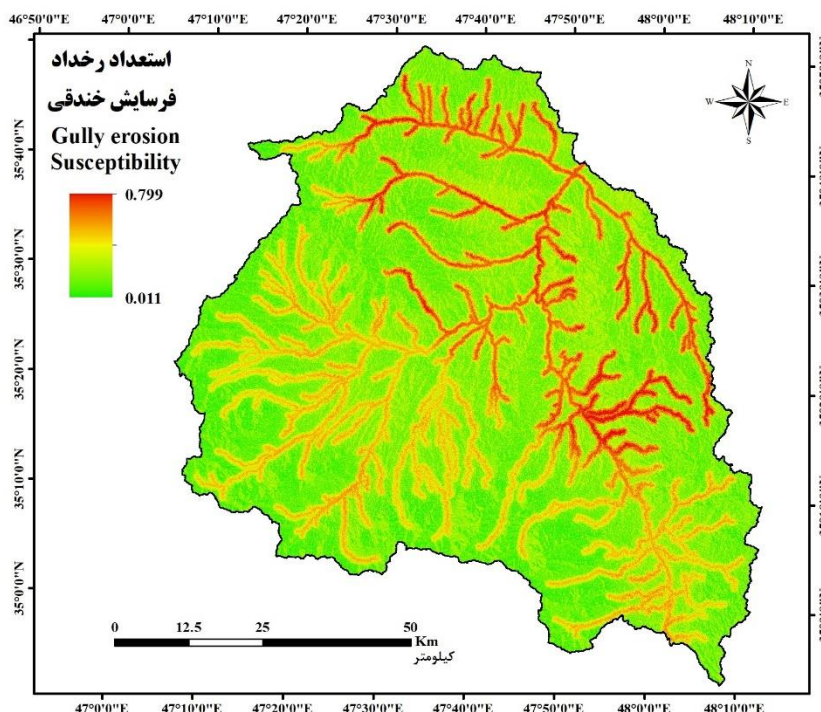
شکل ۴- نقشه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل جنگل تصادفی
Figure 4- Gully erosion susceptibility map using Random Forest model in the Talwar watershed

نقشه‌های استعداد رخداد فرسایش خندقی

نقشه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از مدل جنگل تصادفی در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجایی که بازه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی در مدل‌های هوش مصنوعی بین صفر تا یک متغیر است، می‌تواند به عنوان احتمال ایجاد فرسایش خندقی مطرح شود. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار احتمال ایجاد فرسایش خندقی در این حوضه به ترتیب $0/006$ و $0/996$ به دست آمد. مقدار میانه پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی نیز در پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی $0/322$ محاسبه شد. بنابراین، پنجاه درصد پیکسل‌های این حوضه دارای استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتر از $0/322$ و استعداد نصف دیگر آن از $0/322$ کمتر است.

الگوی مکانی پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی حاصل از مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی توسط این مدل از $0/011$ تا $0/799$ متغیر است. این مدل عموماً بخش‌های مجاور شبکه زهکشی در قسمت‌های میانی، شرقی و شمالی را به عنوان مساعدترین اراضی برای ایجاد و شکل‌گیری فرسایش خندقی معرفی کرد. مقدار میانه در پیش‌بینی انجام‌شده با استفاده از این مدل، $0/387$ به دست آمد. براساس تحلیل نتایج مدل‌های جنگل تصادفی و درختان

رگرسیونی تقویت‌شده برای شناسایی الگوی مکانی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در این حوضه، نتایج نشان داد که عوامل محیطی مختلفی در شکل‌گیری فرسایش خندقی نقش داشته و تفسیر تنها یک عامل نمی‌تواند پیش‌بینی مناسبی برای فرآیند رخداد فرسایش خندقی ارائه دهد. عموماً بخش‌های میانی، شرقی و شمالی این حوضه که در مجاورت آبراهه‌ها و رودخانه‌ها هستند، از استعداد ایجاد فرسایش خندقی بیشتری برخوردار هستند. بخش‌های نزدیک به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها از فرصت تجمع و گذر جریان آب برخوردارند که اصلی‌ترین شرط برای شکل‌گیری فرسایش خندقی است. براساس انطباق مکانی نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی و عوامل محیطی دیگر می‌توان بیان نمود که مناطقی که در ارتفاع کمتری قرار دارند به دلیل تجمع جریان‌های سطحی و زیرسطحی حوزه آبخیز، استعداد بیشتری برای شکل‌گیری خندق دارند. از نظر شاخص موقعیت شیب نسبی نیز می‌توان ملاحظه نمود که مناطقی که مناطق نزدیک یال‌ها و قله‌ها (شاخص موقعیت شیب نسبی زیاد) دارای استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی کمتری نسبت به زمین‌های پای دامنه‌ها و زمین‌های دشتی (شاخص موقعیت شیب نسبی کم) دارند. مناطقی که نزدیک جاده‌ها هستند، بیشتر در معرض شکل‌گیری فرسایش خندقی هستند، زیرا جریان آب تجمع‌یافته در حاشیه جاده‌ها و همچنین جریان آبهاری شدید در پایین‌دست زیرگذر جاده‌ها شرایط مساعدی برای تشکیل فرسایش خندقی دارند.



شکل ۵- نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار با استفاده از مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده

Figure 5- Gully erosion susceptibility map using Boosted Regression Trees model in the Talwar watershed

مستعد فرسایش خندقی قادر می‌سازد.

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌های مورد استفاده

دقت پیش‌بینی دو مدل جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده براساس داده‌های گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد خندق‌های مورد مطالعه) و معیار ارزیابی مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) در جدول ۱ نشان داده شده است. از آنجایی که معیار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، یک روش مستقل از آستانه است، همواره به‌عنوان روش اصلی در ارزیابی دقت پیش‌بینی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس اعتبارسنجی انجام‌شده، مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده در مدل‌های جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده و به‌ترتیب ۰/۹۵۲ و ۰/۸۹۱ به‌دست آمد. بنابراین، مدل جنگل تصادفی دقت بیشتری در پیش‌بینی مکانی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار دارد. همچنین براساس میزان معیار AUC، مدل جنگل تصادفی از نظر دقت و کارایی، در گروه عالی (۰/۹ < AUC) و مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده در گروه خیلی خوب (۰/۸ < AUC < ۰/۹) قرار گرفتند.

یافته‌های پژوهش در کارایی بالاتر مدل جنگل تصادفی در پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی، با نتایج پژوهش‌های رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2017)، گاین و همکاران (Gayen et al., 2019)، گروسی و همکاران (Garosi et al., 2019)، ویی و همکاران (Wei et al., 2022) و ور و همکاران (Were et al., 2023) مطابقت و همخوانی دارد. دلیل برتر بودن عملکرد مدل جنگل تصادفی به ساختار و رویکرد مدل‌سازی آن ارتباط دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به عدم حساسیت مدل به تعداد داده، عدم حساسیت مدل به داده‌های پرت، توانایی مدل در پردازش داده‌های حجیم و همچنین جلوگیری از بیش‌برازش^۱ مدل اشاره کرد.

همچنین به‌عنوان یک موضوع قابل توجه، میزان بارندگی الزاماً رابطه مستقیمی با شکل‌گیری فرسایش خندقی ندارد. مناطق جنوبی حوزه آبخیز تلوار که بیشترین ارتفاع را به خود اختصاص داده‌اند، میانگین بارندگی سالانه بالاتری نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دارند، اما به دلیل فراهم نبودن سایر شرایط مورد نیاز برای شکل‌گیری فرسایش خندقی، استعداد رخداد این پدیده کمتر از دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه به دست آمد. نتایج نشان داد که تشکیل فرسایش خندقی الزاماً مشابه فرسایش‌های سطحی، شیاری و آبراهه‌ای نبوده و بارندگی تنها یکی از عوامل متنوع اثرگذار بر شکل‌گیری آن است. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که اگرچه مناطق شمالی و شمال شرقی حوزه آبخیز تلوار میانگین بارندگی سالانه کمتری نسبت به دیگر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه داشتند، تجمع رواناب‌ها و جریان شبکه زهکشی این حوزه آبخیز در این قسمت‌ها به دلیل فراهم بودن دیگر شرایط محیطی، نقش مهمی در تشکیل فرسایش خندقی داشته است. هنگامی که شاخص توان جریان افزایش می‌یابد، شرایط برای تبدیل شدن چاله‌ها، شیارها و حفره‌ها (فرسایش لانه روباهی) به خندق فراهم می‌شود. براساس ارتباط میان نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی و نقشه‌های استعداد رخداد فرسایش خندقی، مناطقی که در پایین‌دست حوزه آبخیز قرار دارند به دلیل شیب کم اراضی و وجود سطح تولیدکننده رواناب بیشتر در بالادست، جریان آب عبوری از این مناطق به سمت خروجی، فرصت بیشتری برای نفوذ آب به داخل زمین، توسعه فرسایش‌های لانه روباهی و شکل‌گیری خندق‌ها ایجاد می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که کلاس بافت خاک لومی در صورت فراهم بودن شرایط محیطی دیگر، استعداد بیشتری برای شکل‌گیری فرسایش خندقی داشته است. درنهایت می‌توان بیان نمود که تشکیل فرسایش خندقی وابسته به عوامل محیطی متعددی است. مدل‌های یادگیری ماشینی قابلیت بالایی برای تحلیل مکانی ارتباط رخداد فرسایش خندقی و عوامل محیطی مختلف دارد که این مدل‌ها را برای شناسایی مناطق

جدول ۱- دقت مدل‌های استفاده‌شده برای پیش‌بینی مکانی ایجاد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار

Table 1- The accuracy of the applied models for gully erosion generation in the Talwar watershed

مدل Model	مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) Area under the ROC curve (AUC)
جنگل تصادفی Random Forest	0.952
درختان رگرسیونی تقویت‌شده Boosted Regression Trees	0.891

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با عنایت به محدودیت پایگاه داده اطلاعات مکانی از نظر ماهیت عوامل محیطی و قدرت تفکیک مکانی در کشور، در این پژوهش کارایی دو مدل یادگیری ماشینی جنگل تصادفی و درختان رگرسیونی تقویت‌شده در حوزه آبخیز تلوار براساس اطلاعات میدانی با یکدیگر مقایسه شدند. نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی حاصل از مدل جنگل تصادفی از دقت بالاتری نسبت به مدل درختان رگرسیونی تقویت‌شده برخوردار است. براساس نتایج این پژوهش، همه عوامل محیطی مختلف شامل ارتفاع، جهت شیب، موقعیت شیب نسبی، انحنای سطح، انحنای مقطع، درجه شیب، شاخص توان جریان، شاخص ناهمواری توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، میانگین بارندگی سالانه، رده خاک، بافت خاک، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده در رخداد فرسایش خندقی اثرگذار بودند. در حوزه آبخیز تلوار، فاصله از جریان، انحنای مقطع، انحنای سطح، بافت خاک و سنگ‌شناسی نسبت به دیگر عوامل محیطی نقش مهمتری در شکل‌گیری فرسایش خندقی داشتند. نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی مناطقی ابزاری مناسب برای کارشناسان و مدیران منابع طبیعی و آبخیزداری است. قطعاً معطوف کردن اقدامات اجرایی حفاظت خاک و برنامه‌های مدیریتی در مناطق مستعد ایجاد فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز کشور، موجب ارتقاء عملکرد و بهینه‌سازی اعتبارات مالی ادارات منابع طبیعی و آبخیزداری خواهد شد. بانک اطلاعات مکانی

خندق‌ها و همچنین لایه‌های عوامل محیطی حوزه‌های آبخیز، از مهمترین و ضروری‌ترین پیش‌نیازها به‌منظور پیش‌بینی ایجاد فرسایش خندقی محسوب می‌شوند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود دقت لایه‌های محیطی مؤثر در ایجاد فرسایش خندقی، در دستگاه‌های اجرایی افزایش یابد تا میزان کارایی و عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی نیز ارتقاء یابد.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی مستقل با عنوان "مدل‌سازی استعداد وقوع خندق در حوضه تلوار استان کردستان و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به حوضه بابا عرب استان فارس" با کد مصوب ۰۳۰۱-۰۰۰-۱۳-۲۹-۵۳-۲ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری است. نویسندگان این اثر، بر خود فرض می‌دانند از حمایت‌های مادی و معنوی آن پژوهشکده و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، تشکر و قدردانی کنند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

References

- Amiri, M., Pourghasemi, H.R., Ghanbarian, Gh.A., & Afzali, S.F. (2020). Spatial modeling of gully erosion in Maharlou Watershed using different scenarios and Weights-of-evidence algorithm. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 11(4), 1016-1032. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_59
- Asadi Nalivan, O., Rabet, A., Vakili tajareh, F., Ramezani, M., Momeni, M., & Heydari, K. (2023). Zoning gully erosion susceptibility using ANN, CART and RF models. *Watershed Engineering and Management*, 15(2), 155-171. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.356379.1920>
- Bammou, Y., Benzougagh, B., Abdessalam, O., Brahim, I., Kader, Sh., Spalevic, V., Sestras, P., & Ercişli, S. (2024). Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz Plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213(1), 105229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105229>
- Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo- Arias, N.A., & Rotigliano, E. (2018). Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation & Development*, 29(3), 724-736. <https://doi.org/10.1002/ldr.2772>
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., & Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204(1), 399-411. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.021>
- Emadodin, S., Omid, M., Arekhi, S., & Karam, A. (2021). Assessment the Gully Erosion Risk in Quyjoq watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), 17-34. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.34212.1662>
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Conoscenti, C., Pourghasemi, H.R., & Van Oost, K. (2019). Assessing the performance of GIS-based machine learning models with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion. *Science of the Total Environment*, 664(1), 1117-1132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.093>

8. Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H.R., Besalatpour, A.A., Conoscenti, C., & Van Oost, K. (2018). Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330(1), 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.027>
9. Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Saha, S., Keesstra, S., & Bai, S. (2019). Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, 668(1), 124-138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.436>
10. Ghaderi, N., Ghodosi, J., Tabatabai, M.R., & Khaledian, H. (2000). Zoning of gully erosion risk in the Talwar Chay watershed of Kurdistan province using GIS. Report of a Research Project in Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. Identical Code 18781476, p. 139. (In Persian with English abstract). <http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18781476>
11. Ghorbanzadeh, O., Shahabi, H., Mirchooli, F., Valizadeh Kamran, K., Lim, S., Aryal, J., Jarihani, B., & Blaschke, T. (2020). Gully erosion susceptibility mapping (GESM) using machine learning methods optimized by the multi-collinearity analysis and K-fold cross-validation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), pp.1653-1678. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.298>
12. Igwe, P.U., Chinedu, O.C., Nlem E.U., Nwezi, C.C., & Ezekwu, J.C. (2018). A review of landscape design as a means of controlling gully erosion. *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*, 3(1), 103-111. <https://doi.org/10.22161/ijeab/3.1.13>
13. Javidan, N., Kavian, A., Rajabi, S., Pourghasemi, H.R., & Jafarian, Z. (2023). Identification the areas prone to gully erosion and landslides in the form of two-hazards map using machine learning models in Gorganrood watershed. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 17(62), 75-85. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_29
14. Jurchescu, M., & Grecu, F. (2015). Modelling the occurrence of gullies at two spatial scales in the Olteț Drainage Basin (Romania). *Natural Hazards*, 79(1), 255-289. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1981-6>
15. Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret- Picot, M., Deckers, J., Haile, M., & Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 27(12), 1267-1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>
16. Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Shadfar, S., & Zahedi, S. (2023). Modeling gully erosion susceptibility in Talwar watershed, Kurdistan province and evaluating the model transferability to Baba-arab watershed. Final Report of Research Project, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, 76pp. Project code: 2-53-29-013-000301. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.298>
17. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B. (2017). Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, 298(1), 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
18. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Feizizadeh, B. (2019). Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(4), 727-738. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.006>
19. Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., & Shadfar, S. (2024). Principles of spatial modeling of gully erosion using artificial intelligence models. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Press, P. 158. (In Persian with English abstract).
20. Rangzan, K., Zaheri Abdehvand, Z., & Mokarram, M. (2022). Determining areas prone to gully erosion using fuzzy membership function (Case study: Mohr City in the south of Fars province). *Quantitative Geomorphological Researches*, 10(4), 56-74. (In Persian with English abstract). DOR: [20.1001.1.22519424.1401.10.4.4.9](https://doi.org/10.22519424.1401.10.4.4.9)
21. Refahi, H.Gh. (2017). Water Erosion and Its Control. Tehran University Press, 7th edition, 672 pages. (In Persian)
22. Saha, S., Roy, J., Arabameri, A., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2020). Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors*, 20(5), p.1313. <https://doi.org/10.3390/s20051313>
23. Servati, M.R., Ghodosi, J., & Dadkhah, M. (2008). Factors affecting the formation and spread of gully erosion in loess. *Research and Construction*, 21(1), 20-33. (In Persian with English abstract).
24. Shahabi, H., Amiri, Z., & Shirzadi, A. (2022). Prediction of Gully Erosion Susceptibility and Its Hazards in Kloche Bijar Watershed Using Spatial Predictive Models. *Environmental Management Hazards*, 9(2), 89-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.348010.742>
25. Soleimani, F., Soufi, M., & Arsham, A. (2017). Determination of Effective Factors in Gullies Development in Modares Watershed of Shushtar. *Water and Soil*, 31(5), 1432-1446. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i5.63329>
26. Soleimanpour, S., Soufi, M., & Ahmadi, H. (2009). Determining Effective Factors on Gully Development in Konartakhte Region, Fars Province. *Water and Soil*, 23(1), 131-141. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.1545>
27. Vosoghi, S., Zakerinejad, R., & Entezari, M. (2025). Prediction of Gully Erosion and identifying factors affecting

- it using the Maximum Entropy Model and BCC-CSM2-MR climate change models for the years 2020-2040 (case study: Alamarvdasht watershed). *Journal of Geography and Planning*, 28(90), 163-141. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169>
28. Wei, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Cui, T., Guo, Z., Cai, C., & Li, Z. (2022). Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma*, 420(1), 115869. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115869>
29. Were, K., Kebeeny, S., Churu, H., Mumo Mutio, J., Njoroge, R., Mugaa, D., Alkamoi, B., Ng'etich, W., & Ram Singh, B. (2023). Spatial prediction and mapping of gully erosion susceptibility using machine learning techniques in a degraded semi-arid region of Kenya. *Land*, 12(4), 1-19. <https://doi.org/10.3390/land12040890>
30. Zakerinejad, R., & Alvandi, P. (2023). Spatial prediction of gully erosion using TanDEM-X data and maximum entropy model (A case study: Khasoyeh watershed, in Southeast of Fars Province). *Environmental Erosion Research*, 13(1), 96-113. (In Persian with English abstract). <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-705-en.html>

Study of Water Flow and Nitrate Transport under Center Pivot Irrigation Using the HYDRUS-3D Model

S. Etminan¹, V. Jalali^{2*}

1- Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2- Department of Nature Engineering, Shirvan Faculty of Agriculture, University of Bojnord, Iran

(*- Corresponding Author Email: V.Jalali@ub.ac.ir)

Received: 22 April 2025

Revised: 05 August 2025

Accepted: 19 August 2025

Available Online: 19 August 2025

How to cite this article:

Etminan, S., & Jalali, V. (2025). Study of water flow and nitrate transport under center pivot irrigation using the HYDRUS-3D model. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 259-274. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93128.1480>

Introduction

Climate change and drought events over the past decades have led to a decrease in surface and groundwater resources, particularly fresh water sources. On the other hand, the global population growth rate is increasing, which has resulted in a rising demand for food. One of the essential pillars of food security is providing adequate water resources for agricultural use. In recent years, water resource management aimed at improving efficiency has emerged as both a management and research challenge. One proposed strategy is blending saline and fresh water with the application of modern irrigation techniques at the farm scale. This study examines the effects of center-pivot irrigation using saline water sources on alfalfa farm performance over four consecutive years. The effect of this management approach was analyzed using the HYDRUS-3D model, focusing on plant growth and yield, soil moisture variations, leaching rates, and nitrate accumulation within the farm.

Materials and Methods

In this study, a four-year-old alfalfa farm at Birjand University, covering an area of 3 hectares and irrigated using the center-pivot method, was selected. A one-meter-deep soil profile was excavated to examine changes in the soil's physical and chemical properties over time. Soil moisture was measured using Time Domain Reflectometry (TDR) at different depths and various irrigation intervals to assess root-zone moisture dynamics. Since the soil in the study area was deficient in organic matter, soil samples were collected before planting alfalfa. To ensure adequate phosphorus levels, diammonium phosphate fertilizer was applied during the tillering stage. Ammonium and nitrate concentrations were also analyzed by collecting soil samples at different depths over various periods and measuring them using a spectrophotometer. The Levenberg-Marquardt optimization algorithm was employed to estimate hydraulic parameters and solute transport characteristics. To model changes in ammonium and nitrate levels in the soil, the Freundlich adsorption coefficient was applied. For simulating variations in soil moisture, ammonium, nitrate, and plant growth trends in the second and fourth years, the HYDRUS-3D hydraulic model was utilized.

Results and Discussion

The accuracy and efficiency of the HYDRUS-3D model in analyzing soil variations in terms of water flow and solutes transport were assessed using two statistical indices: RMSE (Root Mean Square Error) and NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency). The RMSE values of calibration for soil moisture variations at three studied depths (0-40 cm, 40-60 cm, and 60-100 cm) were 0.0057, 0.0049, and 0.0044 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectively. The NSE values at these depths during the calibration phase were 0.91, 0.98, and 0.99, respectively. For the validation phase, the RMSE and NSE values at 0-40 cm were 0.0021 and 0.97 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, at 40-60 cm were 0.0038 and 0.99, and at 60-100 cm were 0.0029 and 0.99, respectively. Based on the results, the efficiency of the Levenberg-Marquardt optimization algorithm and the capability of the HYDRUS-3D model in simulating soil moisture dynamics in the plant root



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93128.1480>

zone under center-pivot irrigation were verified. The RMSE values for ammonium simulation at the three depths during validation were 0.0055, 0.0003, and 0.0008 mg.l, while the NSE values were 0.97, 0.99, and 0.99, respectively. For nitrate concentration analysis at the same depths, the RMSE values were 0.009, 0.009, and 0.008 mg.l, while the NSE values were 0.99, 0.98, and 0.99, respectively. These findings confirm the effectiveness of the HYDRUS-3D model in estimating solute variations in soil. However, accuracy decreased with depth due to soil heterogeneity and unsaturated conditions, as the model assumes a homogeneous environment. Nitrate accumulation in plants showed an increasing trend as the plant growth period increased. The measured nitrate concentration in two-year-old alfalfa was significantly lower than that in four-year-old alfalfa. Additionally, nitrate accumulation in the root zone of four-year-old plants was higher than the younger ones. This process is influenced by fertilization practices and the expansion of the root system in the fourth year, which enhances nutrient uptake efficiency.

Conclusion

Based on the statistical indices obtained from the simulation of soil variations using the HYDRUS-3D model compared to measured values, it can be concluded that the Levenberg-Marquardt optimization algorithm had provided an accurate and practical estimation of soil hydraulic parameters under the applied management conditions. Furthermore, the HYDRUS-3D model had effectively simulated long-term variations over a four-year period within this management framework. Therefore, both the optimization algorithm and the HYDRUS-3D model demonstrated sufficient capability for assessing soil moisture dynamics and solute variations under modern irrigation management techniques at the farm scale. These methods can serve as powerful tools for formulating management strategies and evaluating the outcomes of different irrigation practices.

Keywords: Hydrous model, Modern irrigation, Reverse solution, Soil salts

مطالعه جریان آب و انتقال نیترات تحت روش آبیاری سنتریپوت با استفاده از مدل HYDRUS-3D

سمانه اطمینان^۱ - وحیدرضا جلالی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

روش‌های نوین آبیاری در سطح مزرعه راهکاری کاربردی در مدیریت معضل کاهش منابع آب شیرین است. در بحث مدیریت منابع آب، نیاز به برآورد پارامترهای هیدرولیکی- فیزیکی خاک می‌باشد. در این پژوهش، با هدف مطالعه میزان کارایی الگوریتم لونبرگ- مارکوارت، به ارزیابی جریان غیراشباع آب تحت روش آبیاری سنتریپوت، انتقال و آبشویی نیترات در سطح مزرعه یونجه چهار ساله در مدل HYDRUS-3D پرداخته شد. در این تحقیق پارامترهای حاکم بر میزان نفوذپذیری آب و انتقال املاح با استفاده از الگوریتم لونبرگ- مارکوارت در شرایط واقعی برآورد گردید. به‌منظور شبیه‌سازی روند تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم در امتداد ستون خاک از ضریب جذب فروندلیچ بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی HYDRUS-3D، بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی جریان آب با $RMSE = 0.0057 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (خطای ریشه میانگین مربعات) و $NSE = 0.98$ (ناش-ساتکلیف) و $0.98 = NSE$ در لایه سطحی، و $RMSE = 0.0049 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $NSE = 0.99$ در لایه عمقی خاک بود. میزان دقت مدل در بررسی روند تغییرات نیترات خاک نیز در دو لایه سطحی و عمقی به‌ترتیب برابر با $RMSE = 0.009 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $RMSE = 0.008$ به دست آمد. همچنین در این تحقیق به بررسی روند جذب نیترات توسط گیاه طی چهارسال پرداخته شد که روند تغییرات بیانگر افزایش جذب نیترات در گیاه بود. براساس نتایج حاصله می‌توان ذکر نمود که الگوریتم لونبرگ- مارکوارت به‌خوبی توانسته روند تغییرات پارامترها را در مدل HYDRUS-3D تحت روش آبیاری سنتریپوت شبیه‌سازی نماید. از این رو می‌توان بیان نمود الگوریتم لونبرگ- مارکوارت قادر به برآورد تغییرات پارامترها تحت روش‌های نوین آبیاری حتی در مدل‌های چند بعدی نیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نوین، املاح خاک، حل معکوس، مدل هایدروس

مقدمه

مدیریت آب با هدف مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری آن، مورد توجه محققین و کشاورزان در سطح مزرعه در طی سال‌های اخیر قرار گرفته است. توسعه روش‌های مدیریت منابع آب نیازمند ارزیابی میزان نفوذ، جریان آب در پروفیل خاک و بررسی میزان عملکرد محصولات بسته به نوع روش مدیریت آبیاری می‌باشد (Wang et al., 2015). از آنجایی که مطالعه روش‌های آبیاری در گیاهان گوناگون در سطح مزرعه، بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد، به‌طور معمول از روش‌های ریاضی و مدل‌های عددی در توصیف ویژگی‌های آب خاک و انتقال

افزایش جمعیت و نیاز روزافزون بشر به مواد غذایی و از سوی دیگر کاهش منابع آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک سبب فشار مضاعف بر منابع آب شیرین شده است (Ghazouani, Autovino, Rallo, Douh, & Provenzano, 2016). از آنجایی که کارایی مدیریت آب در بخش کشاورزی اهمیت بسزایی در افزایش تولیدات آبی دارد، روش‌های نوین

۱- دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: V.Jalali@ub.ac.ir

Parameters (BEST) method تخمین زدند و با کاربرد روش حل معکوس پارامترهای مورد نظر بهینه‌سازی شدند. کای و همکاران (Cai, Vanderborcht, Couvreur, Mboh, & Vereecken, 2018) در مطالعه میزان جذب آب توسط ریشه‌های گندم زمستانه با استفاده از روش حل معکوس پارامترهای موردنیاز در برآورد میزان جریان آب در خاک و پتانسیل رشد ریشه و جذب رطوبت توسط آن بهینه‌سازی نمودند. صالحی و همکاران (Salehi, Navabian, Varaki, & Pirmoradian, 2017) با استفاده از Marquardt-Levenberg optimization algorithm (Marquardt, 1963) به بهینه نمودن پارامترهای مورد نیاز برای مطالعه انتقال نیتрат و میزان جریان آب طی فرآیند زهکشی در مزارع زیرکشت برنج پرداختند. ایشان بیان نمودند که مدل هایدروس به خوبی توانسته میزان انتقال نیترات خاک را شبیه‌سازی نماید. همچنین نتایج مطالعات بaram و همکاران (Baram et al., 2016) نشان داد که با کاربرد مدل هایدروس می‌توان روند تغییرات نیترات خاک در محدوده ریشه درختان میوه تا عمق ۳ متر را مورد ارزیابی قرار داد. مطالعات صورت گرفته بیانگر اهمیت مطالعه نیترات در امتداد پروفیل خاک در محدوده ریشه گیاهان زراعی و باغی است.

با توجه به افزایش کاربرد کودهای شیمیایی مطالعه روند آبشویی نیترات در محدوده ریشه گیاه، میزان آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی یکی از مسائل مهم در بحث مدیریت کشاورزی به‌ویژه کشاورزی پایدار در سطح جهان می‌باشد (Viers et al., 2012). از این‌رو، مطالعات بسیاری در ارزیابی و توسعه روش‌هایی که به خوبی بتواند روند آبشویی و تغییرات مکانی و زمانی غلظت نیترات خاک را نشان داد، صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات تورکلتاب و همکاران (Turkeltaub, Kurtzman, & Dahan, 2016; Turkeltaub, Kurtzman, Russak, & Dahan, 2015) اشاره نمود. همچنین مطالعات بسیاری در زمینه آبشویی نیترات با توجه به روش آبیاری، سیستم کشت و کار، کوددهی و ویژگی‌های خاک با هدف بررسی تغییرات کمی و کیفی نیترات در سطح مزرعه صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات بیانگر اهمیت روند تغییرات نیترات تحت روش آبیاری و روند کوددهی است همچنین، نشان‌دهنده قابلیت مدل‌های عددی در فرآیند شبیه‌سازی انتقال نیترات و جریان آب در خاک است که با کاهش محدودیت‌ها به‌عنوان ابزاری سودمند و کاربردی در مطالعه و ارزیابی روش‌های مدیریتی شناخته شده‌اند (Salehi et al., 2017). با توجه به مطالعات صورت گرفته بررسی روند تغییرات غلظت عناصر غذایی در محیط ریشه متأثر از روش مدیریتی (کوددهی و آبیاری) به‌کار رفته در جهت افزایش عملکرد همراه با کاهش مصرف بهینه منابع آب و همچنین ارزیابی روند آلودگی و تجمع عناصر غذایی در خاک به‌منظور حفظ سلامت خاک امری ضروری است. در این چند دهه اخیر از مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی برای برآورد تغییرات حاصل در سطح

املاح استفاده می‌گردد (Wang et al., 2010; Liu et al., 2011; He et al., 2013). مدل‌های عددی یک روش کارآمد در مطالعه میزان انتقال آب و املاح در سرتاسر پروفیل خاک تحت روش‌های مختلف مدیریتی هستند. مطالعات بسیاری در زمینه انتقال آب و املاح با استفاده از مدل‌های عددی، میزان پاسخگویی محصولات تحت شرایط مختلف اقلیمی و زراعی را بررسی نموده‌اند (Rallo, Baïamonte, Juárez, & Provenzano, 2014; Ghazouani et al., 2016). در میان مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل هایدروس به‌دلیل عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی آب، گرما و انتقال املاح تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی و میدانی به‌طور وسیع مورد توجه قرار گرفته است. محققین مختلفی میزان عملکرد مدل هایدروس در شبیه‌سازی جریان آب و انتقال نیترات در ستون افقی خاک رسی را بررسی کردند که بیانگر توانایی مدل هایدروس در یکپارچه‌سازی فرآیندهای جریان غیراشباع و انتقالی است هر چند که فرضیات بکاررفته در این مدل برپایه شرایط همگن است. (Ebrahimian, Liaghat, Parsinejad, Abbasi, & Navabian, 2012; Dash, Sarangi, Singh, Singh, & Adhikary, 2015; Jha, Sahoo, & Panda, 2017; Kirkham, Smith, Doyle, & Brown, 2019). مطالعاتی نیز در زمینه قابلیت برآورد تغییرات توزیع آب و انتقال نیترات تحت روش‌های مختلف حفاظتی توسط مدل هایدروس صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان داد که مدل هایدروس قابلیت لازم برای ارزیابی روند تغییرات رطوبت و املاح خاک تحت روش‌های مختلف کشاورزی را دارد (Shafeeq et al., 2020; Rana et al., 2022; Morianou, Karatzas, Arampatzis, Pisinaras, & Kourgialas, 2025). نتایج مطالعات (Wang et al., 2015) نشان داد که مدل هایدروس در روش آبیاری بارانی به خوبی قادر به بررسی میزان حرکت آب، نفوذپذیری خاک و همچنین قادر به ارزیابی میزان عملکرد محصول و ضریب کارایی آب تحت شرایط گوناگون هیدرولوژیکی می‌باشد. در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب، هدایت گرما و انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک نیاز به تعیین مقدار حقیقی پارامترها از نظر فیزیکی می‌باشد. روش حل معکوس یکی از روش‌های کاربردی و متداول در برآورد پارامترها در بسیاری از مدل‌های خاک است که امروزه به‌عنوان یک ابزار بهینه‌ساز برای کاربران مدل‌های عددی شناخته شده است (Hopmans, Šimůnek, Romano, & Durner, 2002; Wöhling, Vrugt, & Barkle, 2008). الگوریتم لونبرگ-مارکوارت و روش بیزین از جمله روش‌های حل معکوس محسوب می‌شوند که می‌توانند برای بهینه‌سازی پارامترهای خاک برپایه داده‌های اندازه‌گیری‌شده در یک مسئله تعریف‌شده بکار گرفته شوند (Vrugt & Bouten, 2002; Mallants, Karastanev, Antonov, & Perko, 2007). سیلوا و همکاران (Silva Ursulino et al., 2019) به‌منظور مدل‌سازی جریان آب در خاک با استفاده از مدل Soil Transfer، پارامترهای هیدرولیکی خاک را با روش

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بیرجند واقع در ۵ کیلومتری شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی (32°53' N, 55°13' E) واقع در شرق ایران انجام شد. بیرجند با میانگین دمای سالانه برابر با ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، با ۱۷۱ میلی‌متر میانگین بارش سالانه و با ۴۸ روز یخبندانی در طول سال، در منطقه‌ای با آب و هوای خشک-نیمه خشک و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است (Golmohammadi, 2014).

این پژوهش در زمینی به وسعت سه هکتار زیرکشت یونجه چهار ساله صورت گرفت. از این رو، به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های خاک، پروفیلی به ابعاد ۷۰×۷۰×۱۰۰ سانتی‌متر مکعب حفاری گردید. پروفیل مورد نظر از دو لایه خاک به‌ترتیب از عمق ۴۰-۱۰۰ و ۴۰-۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. با هدف مطالعه ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک از هر دو لایه نمونه‌برداری صورت گرفت (جدول ۱). در این مزرعه با توجه به اقلیم منطقه و با هدف افزایش بهره‌وری و کاهش منابع آب، از روش آبیاری سنتریپوت استفاده گردید.

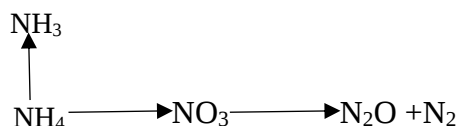
مزرعه طی مدیریت‌های اعمال‌شده با اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مدل‌های هیدرولیکی مانند HYDRUS که قابلیت چند بعدی دارند از جهت ارزیابی روند تغییرات غلظت عناصر غذایی و جریان آب در خاک از ابعاد مختلف حائز اهمیت و ارزش علمی بالایی دارد. همچنین برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در سطح مزرعه با شرایط مختلف اقلیمی و روش‌های مدیریتی مختلف یکی دیگر از مسائل مطرح است که روش برآورد و میزان دقت آن بازگو کننده میزان دقت مدل در بررسی روش‌های مدیریتی تحت شرایط مختلف جغرافیایی و اقلیمی می‌باشد. بدین منظور با توجه به اهمیت بررسی انتقال عناصر غذایی و رطوبت در محیط ریشه تحت تأثیر روش‌های مدیریتی آبیاری و کوددهی، هدف این پژوهش ارزیابی دقت مدل HYDRUS-3D در شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی نیترات، آمونیوم و رطوبت خاک در مزرعه یونجه با سامانه آبیاری سنتریپوت می‌باشد. بدین منظور، در مرحله نخست با استفاده از مدل-HYDRUS 1D و الگوریتم بهینه‌ساز Marquardt-Levenberg، بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک صورت گرفت. در ادامه، عملکرد مدل HYDRUS-3D در شبیه‌سازی سه‌بعدی حرکت آب و املاح و تحلیل نقش روش آبیاری در بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش آبخسوی و حفظ سلامت خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دقت الگوریتم بهینه‌سازی مذکور در شرایط اقلیمی منطقه و تحت مدیریت اعمال‌شده ارزیابی شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب

Table 1- Soil physical and chemical properties

ویژگی‌های فیزیکی خاک Soil physical properties	توزیع اندازه ذرات خاک Soil particle size distribution (%)				جرم مخصوص Bulk Density (g cm ⁻³)	هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic conductivity (cm day ⁻¹)	تخلخل Porosity	درجه اشباع خاک Degree of soil saturation (cm ³ cm ⁻³)
	افق‌های خاک Soil layers (cm)	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay				
	0-40	61	18	21	1.55	8.3	0.4	0.39
	40-100	77	6	17	1.72	42.9	0.34	0.33
ویژگی‌های شیمیایی خاک Soil chemical properties	افق‌های خاک Soil layers (cm)	هدایت الکتریکی electrical conductivity (dS m ⁻¹)	pH	مواد آلی Organic matter (%)	کربنات کلسیم Carbonate Calcium (%)	نیتروژن کل Total Nitrogen (%)	فسفر قابل دسترس Phosphor available (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل دسترس Potassium available (mg kg ⁻¹)
	0-40	4.5	7.68	0.6	8.25	5	16.2	227
	40-100	8.3	7.91	0.43	10	6	18.6	230
ویژگی‌های آب Water properties	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (dS m ⁻¹)	pH	آمونیم Ammonium mg L ⁻¹	نیترات Nitrate mg L ⁻¹	فسفر Phosphorus mg L ⁻¹	سدیم Sodium mg L ⁻¹	کلسیم Calcium mg L ⁻¹	منیزیم Mangnesium mg L ⁻¹
	2.82	7.93	---	---	---	380	0.305	1.28

شده است. از این رو، با استفاده از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول میزان انتقال نیترات ارزیابی گردید. براساس مطالعه هانسون (Hanson, 2006) (Šimunek & Hopmans, 2006) روند تغییرات NH_4 به شرح زیر است:



چرخه فوق شامل چند فرآیند می‌باشد: (۱) تبخیر آمونیاک، (۲) نیتریفیکاسیون، (۳) دنیتریفیکاسون، (۴) جذب سطحی آمونیوم در سطح خاک، و (۵) جذب آمونیوم و نیترات توسط سیستم ریشه که فرآیندهای ذکر شده با استفاده از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Hanson et al., 2006). در این تحقیق کود مصرفی به روش سرک به خاک اضافه گردید. بنابراین می‌توان از فرآیند تبخیر آمونیاک صرف‌نظر نمود. همچنین به دلیل پایین بودن درصد ماده آلی خاک و اعمال شرایط غیراشباع طی روش آبیاری در سطح خاک، فرآیند دنیتریفیکاسیون نیز قابل صرف‌نظر می‌باشد. برای بررسی سایر فرآیندها از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول استفاده می‌گردد.

معادلات دیفرانسیلی حاکم بر انتقال املاح طی جریان آب در خاک در یک محیط متخلخل با شرایط اشباع تغییرپذیر در زنجیره تغییر شکل مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود (Šimunek et al., 2013):

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_w \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C}{\partial z} - \mu_w \theta C \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho S_1}{\partial t} + \frac{\partial a_v g_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_1^w \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(a_v D_1^g \frac{\partial g_1}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_1}{\partial z} \\ &- \mu_{w,1} \theta C_1 + \mu_{w,2} \theta C_2 \\ &+ \gamma_{s,1} \rho - r_{a,1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta C_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_2^w \frac{\partial C_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_2}{\partial z} \\ &- \mu_{w,2} \theta C_2 + \mu_{w,1} \theta C_1 \\ &- r_{a,2} \end{aligned} \quad (9)$$

C: غلظت املاح در فاز مایع (mg L^{-1})، S: غلظت املاح در فاز جامد (mg g^{-1})، g: غلظت املاح در فاز گاز (mg L^{-1})، θ : درصد رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، ρ : جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3})، q: شدت جریان (cm day^{-1})، μ_w : نرخ ثابت مرتبه

برای بررسی جریان آب در امتداد پروفیل خاک در دوره آبیاری از TDR (مدل IMKO) در ۳ عمق (۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر) استفاده گردید که درصد رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری و در فواصل دوره آبیاری اندازه‌گیری شد. دوره آبیاری شش روزه، به مدت هشت ساعت با دبی ۰/۵ متر مکعب در ثانیه صورت گرفت.

همچنین برای بررسی میزان انتقال نیترات و آمونیوم نیز در بازه زمانی قبل و بعد از کوددهی در امتداد پروفیل نمونه‌برداری صورت گرفت و به روش اسپکترومتر و کج‌لدال اندازه‌گیری شد.

مدل هایدروس

مدل هیدرولوژیکی هایدروس با حل عددی معادله ریچاردز (Šimunek et al., 2013) به بررسی جریان آب در خاک می‌پردازد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

θ : درصد رطوبت حجمی خاک (بدون بعد)، h: بار فشاری [L]، S: بیانگر جذب آب توسط ریشه است $[T^{-1}]$ ، x_i و x_j : مختصات مکانی [L]، t: زمان [T]، K_{ij}^A : اجزاء ناهمسانگرد تانسور بدون بعد و K: تابع هدایت هیدرولوژیکی غیراشباع خاک $[LT^{-1}]$.

در این مطالعه، مدل هایدروس برای تشریح منحنی رطوبتی خاک، $\theta(h)$ و هدایت هیدرولوژیکی غیراشباع خاک، $K(h)$ از معادله ون‌گونختن - معلم (۱۹۷۶) استفاده می‌گردد:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} + \theta_r & \text{if } h \leq 0 \\ \theta_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e^L \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 & \text{if } h \leq 0 \\ K_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

θ_s و θ_r : به ترتیب درصد رطوبت باقی‌مانده و اشباع خاک (بدون بعد)، α : عکس مکش در نقطه ورود هوا $[L^{-1}]$ ، K_s : هدایت هیدرولوژیکی اشباع خاک $[LT^{-1}]$ ، n: شاخص توزیع اندازه ذرات (بدون بعد)، S_e : اشباع مؤثر (بدون بعد) و l: پارامتر اعوجاج (بدون بعد) برابر با ۰/۵ تخمین زده شده است (Mualem, 1976).

با کاربرد مدل هایدروس می‌توان به‌طور همزمان سرنوشت و انتقال چند نوع نمک را در زنجیره تغییر شکل مرتبه اول و صفر بررسی نمود (Šimunek et al., 2013). در این تحقیق به بررسی انتقال نیترات در امتداد پروفیل خاک طی کاربرد کود سوپر فسفات دی آمونیوم پرداخته

برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد. شاخص سطح برگ نیز با اندازه‌گیری سطح هر برگ با استفاده از دستگاه برگ‌سنج مدل Licow تعیین گردید.

شرایط مرزی برای جریان آب و انتقال املاح در مدل سه بعدی هایدروس

مرز بالایی به علت اینکه در تماس با اتمسفر است و میزان تبخیر از سطح خاک، بارندگی، ترق از سطح گیاه و سطح آب زیرزمینی تأثیر دارند، شرایط مرزی اتمسفری در نظر گرفته شد. از سوی دیگر به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در سطح مزرعه، آب مازاد از منطقه ریشه خارج گردید و امکان تهویه و تنفس ریشه گیاه فراهم بود، زهکشی آزاد به‌عنوان شرایط مرزی پایینی انتخاب گردید. برای بررسی انتقال املاح نیز از شرایط مرزی نوع سوم کوشی، مرز بالایی از نوع ۳ (دبی غلظت شرایط مرزی) و مرز پایینی از نوع ۲ (شیب غلظت صفر) در نظر گرفته شد.

برآورد پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز در مدل هایدروس
برای بررسی جریان آب در خاک، میزان انتقال نیترات در امتداد پروفیل خاک نیاز به تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که در این تحقیق از روش حل معکوس برپایه Marquardt–Levenberg optimization algorithm (Marquardt, 1963) در محیط مدل هایدروس ۱ بعدی به‌منظور کاهش عدم قطعیت مدل و برآورد بهتری از پارامترها استفاده گردید. در مدل ۳ بعدی تغییرات مکانی و زمانی سبب افزایش عدم قطعیت در برآورد پارامترها می‌گردد. برای اجتناب از افزایش خطا از مدل هایدروس ۱ بعدی استفاده شد. برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک نیاز به تعیین مقدار اولیه آن‌ها می‌باشد که از خروجی نرم‌افزار Rosetta استفاده گردید. بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی با هدف کمینه‌کردن مقدار رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده در دو عمق مورد مطالعه در زمان‌های مختلف آبیاری صورت گرفت. همچنین پارامترهای انتقال املاح: μ_w ، μ_s ، K_d ، ε_L ، ε_T نیز با هدف کمینه‌کردن اختلاف بین غلظت آمونیوم و نیترات اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده در دو عمق و در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری بهینه‌سازی شدند. ضریب پخشیدگی مولکولی آمونیوم و نیترات در آب خالص به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶۴ و ۰/۰۶۸ سانتی‌متر مربع در ساعت (Hanson et al., 2006; Ravikumar et al., 2011) در نظر گرفته شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل هایدروس

در این تحقیق داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، غلظت نیترات و آمونیوم در سه عمق موردنظر در طی سه ماه متوالی از ژوئن (تیر ماه)

اول برای املاح در فاز مایع (day^{-1})، μ_w : مشابه نرخ ثابت مرتبه اول که ارتباط بین گونه‌های منحصر به فرد زنجیره را فراهم می‌سازد. γ_s : نرخ ثابت مرتبه صفر ام در فاز جامد (day^{-1})، x_d : جذب عناصر غذایی توسط ریشه ($mg L^{-1} day^{-1}$)، D_w : ضریب پخشیدگی در فاز مایع ($cm^2 day^{-1}$)، D_g : ضریب پخشیدگی در فاز گاز ($cm^2 day^{-1}$)، زیرنویس ۱ و ۲ نیز به‌ترتیب بیانگر NH_4 و NO_3 است. جذب و واجذب NH_4 بین سطح محلول خاک و مکان‌های تبدیلی خاک به‌عنوان یک واکنش فوری در نظر گرفته می‌شود (Nakasone, Abbas, & Kuroda, 2004).

$$S_1 = K_{d1} C_1 \quad (۱۰)$$

K_{d1} : ضریب توزیع NH_4 ($L mg^{-1}$) است. در مدل هایدروس علاوه بر توزیع آب در خاک، جذب آب توسط ریشه گیاه تحت کشت با استفاده از مدل المان محدود و مدل فلدس (RWU root water uptake) قابل برآورد می‌باشد. در معادله ریچاردز پارامتر S تعریف شده است که درواقع بیانگر میزان آب جذب‌شده توسط ریشه براساس مدل فلدس می‌باشد.

$$S_r(\phi xz) = \alpha(\phi xz) \times b(xz) \times T_p \times L \quad (۱۱)$$

$\alpha(\phi, x, z)$ عبارت است از تابع پاسخ تنش آبی که یک تابع بدون بعد از پتانسیل ماتریک خاک (ϕ) است. همچنین $b(xz)$ تابع توزیع نرمال شده جذب آب، L (cm) عرض سطح خاک در ارتباط با ترق و T_p ($cm day^{-1}$) نرخ پتانسیل ترق است (Deb, Shukla, & Šimůnek, 2013). در این مطالعه گیاه تحت تنش آبی قرار نداشت. از این‌رو، مقدار α برابر با ۱، طی تغییرات (ϕ) در دامنه بین ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سانتی‌متر و بین ۱۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی‌متر به‌ترتیب در بازه حداکثر و حداقل پتانسیل ترق روزانه در نظر گرفته شد. برای تعیین پارامترهای موردنیاز $b(xz)$ که به‌ترتیب عبارتند از حداکثر عمق ریشه‌دهی، عمق حداکثر تراکم ریشه، شعاع حداکثر ریشه‌دهی و شعاع حداکثر تراکم طولی ریشه است، از عمق‌های ۱۰۰-۶۰ و ۴۰-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری صورت گرفت. برای تعیین پتانسیل برای برآورد ET_0 روزانه از گزارش‌های ایستگاه هواشناسی دانشگاه بیرجند استفاده گردید. ET_c نیز طی ضرب ET_0 در ضریب محصول مورد نظر (K_c) براساس نشریه ۵۶-FAO تخمین زده شد. همچنین برای تعیین مقدار پتانسیل تبخیر از سطح خاک (E_p) و نرخ پتانسیل ترق (T_p) از فرمول زیر استفاده گردید:

$$E_p = ET_c \exp(-k LAI) \quad (۱۲)$$

$$T_p = ET_c - E_p \quad (۱۳)$$

k ضریب جذب نور می‌باشد که در این مطالعه برای گیاه یونجه

تا ماه اوت (پایان شهریور ماه) در سال ۲۰۱۸ صورت گرفت. برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های دو ماه ژوئن و ژوئیه استفاده گردید. داده‌های ماه اوت برای واسنجی مدل به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی میزان عملکرد مدل از سه شاخص آماری، ضریب تبیین (R^2)، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و معیار ناش-ساتکلیف (NSE) استفاده گردید.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_i - O_i]^2} \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

O_i : مقدار اندازه‌گیری‌شده در روز i ام، P_i : مقدار شبیه‌سازی‌شده در روز i ام، $\bar{O}$: میانگین مقدار اندازه‌گیری‌شده، N : تعداد کل نقاط نمونه‌برداری.

شاخص $NSE = 1$ بیانگر تطبیق کامل بین شبیه‌سازی مدل و مقادیر اندازه‌گیری است. $NSE = 0$ میزان دقت برآورد مدل برابر با میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است. درحالی که مقدار NSE کمتر از صفر به دست آید، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به خروجی مدل دارای عملکرد بهتری می‌باشد. بنابراین، هر چه مقدار NSE به یک نزدیک‌تر باشد، مدل در شبیه‌سازی دارای دقت بالای است (Nash, 1970).

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل ۳ بعدی هایدروس

با توجه به جدول ۱، از نظر توزیع اندازه ذرات، خاک مزرعه در لایه سطحی از نوع سنگین (Sandy Clay Loam) و در لایه عمقی از نوع سبک (Sandy Loam) بود. از این رو، دوره آبیاری ۶ روز با دبی ۰/۵ متر مکعب در ثانیه انتخاب شد. در هر دوره آبیاری مزرعه به مدت ۸ ساعت و دامنه رشد گیاه پونجه ۴۵ روزه بود. با توجه به نتایج جدول ۱، خاک مزرعه از نظر مواد آلی نسبتاً فقیر بود و همچنین از نظر عناصر غذایی نیز در محدودیت قرار داشت. از این رو، از کود سوپر فسفات دی آمونیوم به‌طور تناوبی در هر دوره آبیاری به‌صورت سرک استفاده گردید. به دلیل فقیر بودن خاک از نظر فسفر، تأمین فسفر از طریق کوددهی در زمان آماده‌سازی زمین جواب‌گوی نیاز گیاه طی دوره چهار ساله نبود. در کنار بازه طولانی مدت دوره کشت، خاک منطقه از نوع آهکی است که مانع در دسترس قرار گرفتن فسفر برای ریشه گیاه نیز می‌گردد. بنابراین به‌منظور تأمین فسفر در بازه‌های زمانی مختلف، این کود متناوباً در چین‌های یک درمیان استفاده شد. قابل ذکر است اگرچه گیاه تحت مطالعه از خانواده بقولات بود. به دلیل درصد پایین مواد آلی خاک،

بالا بودن دمای سطح خاک و مصرف کود و همچنین استفاده از آب نسبتاً شور به‌عنوان منبع آبیاری سبب عدم تشکیل غدد تثبیت‌کننده نیتروژن در سیستم ریشه‌ی گیاه گردید (Eardly, Hannaway, & Bottomley, 1985; Hannaway & Shuler, 1993). برای بررسی میزان جریان آب در خاک طی روش آبیاری و همچنین مطالعه انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک نیاز به برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح می‌باشد. در این مطالعه پارامترهای موردنیاز برای برآورد رطوبت و غلظت املاح با استفاده از داده‌های رطوبت خاک طی اندازه‌گیری با TDR در زمان‌های مختلف آبیاری و مقدار غلظت نترات و آمونیوم در زمان‌های گوناگون با استفاده از حل معکوس برپایه الگوریتم لوبرگ-مارکوارت بهینه‌سازی گردید. قابل ذکر می‌باشد که روند تغییرات رطوبت و املاح در خاک تحت مدل هایدروس ۳ بعدی بررسی شد. تغییرات مکانی از عوامل مؤثر در افزایش خطا و کاهش دقت مدل در بهینه‌سازی پارامترها است. به‌منظور به حداقل رساندن عدم قطعیت پارامترها در مرحله بهینه‌سازی از مدل هایدروس ۱ بعدی بهره گرفته شد. در این تحقیق با هدف کاهش منبع آبیاری و افزایش بهره‌وری از روش آبیاری سنتریپوت استفاده شد. بنابراین در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب در خاک، جریان غیراشباع خاک، با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری در حد بالای شرایط مرزی حکمفرما است. پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای مطالعه جریان آب در خاک طی روش آبیاری سنتریپوت برپایه مقادیر اولیه حاصل از نرم‌افزار Rosetta بهینه‌سازی شدند (جدول ۲).

در کنار جریان آب در خاک، میزان انتقال نترات و آمونیوم در سرتاسر پروفیل بررسی گردید که قابل ذکر می‌باشد که به دلیل پایین بودن درصد مواد آلی، نیتروژن و فسفر خاک سبب اعمال مدیریت کوددهی در سطح مزرعه به روش سرک شد. با توجه به فرآیند کوددهی و کاربرد آب آبیاری با EC بالا در مرز شوری سبب عدم تشکیل غدد تثبیت‌کننده نیتروژن در سطح ریشه گیاه گردید. همچنین به دلیل حاکم بودن شرایط غیراشباع در محیط ریشه گیاه در تمام دوره کشت، در این تحقیق فرآیند نیتریفیکاسیون طی فرآیند کوددهی با توجه به شرایط حاکم در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن فرآیند نیتریفیکاسیون پارامترهای مورد نیاز، ضریب جذب (K_d)، ضریب انتشارپذیری طولی و عرضی (ϵ_L و ϵ_T) و μ_s و μ_w برای هر دو عنصر مورد مطالعه بهینه‌سازی شدند (جدول ۲). ضریب توزیع در دو عمق مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۳/۰۹ و ۳ سانتی‌متر مکعب بر گرم به‌دست آمد که در محدوده تغییرات حاصل توسط هانسون و همکاران (Hanson et al, 2016) قرار دارد و با نتایج آزاد و همکاران (Azad, Behmanesh, Rezaverdinejad, Abbasi, & Navabian, 2018) طی بهینه‌سازی پارامترهای انتقال نترات و آمونیوم در خاک نیز هم‌خوانی دارد.

جدول ۲- مقادیر بهینه شده از الگوریتم مارکوآدت-لویبنبرگ

Table 2- Optimized values of Marquardt-Levenberg algorithm

افق های خاک Soil layers (cm)	ویژگی های هیدرولیکی خاک Soil hydraulic properties					پارامترهای انتقال املاح Solute Transport Parameters				
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	ε_T (cm)	ε_L (cm)	K_d (cm ³ g ⁻¹)	μ_s (day ⁻¹)	μ_w (day ⁻¹)
0-40	0.051	0.34	0.03	1.25	8.1	0.4	0.04	3.09	0.179	0.166
40-100	0.06	0.38	0.027	1.5	47.2	0.6	0.06	3	0.202	0.2

θ_r : The residual water content. θ_s : The saturated water content. α : The inverse of the air-entry value. n: the pore size distribution index. K_s : The saturated hydraulic conductivity. ε_T : Transversal dispersivity of soil. ε_L : Longitudinal dispersivity of soil. K_d : Distribution coefficient of NH₄⁺-N sorption by soil particles. μ_s : Rate coefficient of nitrification in the solid phase. μ_w : Rate coefficient of nitrification in a liquid phase.

θ_r : رطوبت باقی مانده، θ_s : رطوبت اشباع. α : نقطه ورود هوا. n: شاخص توزیع اندازه خلل و فرج. K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع. ε_T : پراکندگی عرضی خاک. ε_L : پراکندگی طولی خاک. K_d : ضریب پخشیدگی جذب آمونیوم توسط ذرات خاک. μ_s : ضریب نرخ نیتریفیکاسیون در فاز جامد. μ_w : ضریب نرخ نیتریفیکاسیون در فاز مایع.

روند تغییرات املاح در سه عمق با نتایج حاصل از شبیه سازی از مدل هایدروس ۳ بعدی مورد مقایسه قرار گرفت. روند تغییرات رطوبت، نیترات و آمونیوم خاک در امتداد پروفیل خاک براساس ۳ شاخص آماری، R²، RMSE و NSE بررسی شدند (جدول ۳). مقدار شاخص RMSE برای رطوبت خاک در عمق های مورد مطالعه در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۷، ۰/۰۰۴۹ و ۰/۰۰۴۴ به دست آمد.

برای ارزیابی عملکرد مدل هایدروس ۳ بعدی برپایه بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح طی حل معکوس لونبرگ-مارکوآدت در مدل هایدروس ۱ بعدی، نیاز به واسنجی مدل هایدروس ۳ بعدی می باشد. بدین منظور برای بررسی میزان جریان آب در خاک و میزان کارایی عملکرد مدل هایدروس ۳ بعدی در انتقال نیترات و آمونیوم، به ترتیب مقدار رطوبت اندازه گیری شده با استفاده از TDR و

جدول ۳- نتایج حاصل از شاخص های آماری بین رطوبت و انتقال املاح اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

Table 3- The obtained results of the statistical analysis between measured and simulated soil water content and solute transport.

	Soil layers (cm)	Statistical Index	Water content (cm ³ cm ⁻³)	NO_3^{-1} (mg L ⁻¹)	NH_4^{+} (mg L ⁻¹)
Validation of HYDRUS 3-D model	0-40	RMSE		0.0057	0.009
		NSE		0.91	0.99
		R ²		0.93	0.93
	40-60	RMSE		0.0049	0.009
		NSE		0.98	0.98
		R ²		0.94	0.91
	60-100	RMSE		0.0044	0.008
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.95	0.93
Validation of HYDRUS 3-D model	0-40	RMSE		0.0021	0.009
		NSE		0.97	0.98
		R ²		0.94	0.94
	40-60	RMSE		0.0038	0.006
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.96	0.95
	60-100	RMSE		0.0029	0.008
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.96	0.95

همچنین برای بررسی دقت مدل در مرحله واسنجی از شاخص NSE و R^2 استفاده گردید که بر طبق **جدول ۳** مقدار NSE به ترتیب در عمق‌های ۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر برابر با ۰/۹۸، ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و مقادیر R^2 برابر ۰/۹۳، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ به ترتیب بدست آمد. براساس شاخص NSE و R^2 می‌توان ذکر نمود که مدل هایدروس در عمق‌های مورد نظر در برآورد رطوبت خاک از دقت بالایی برخوردار است. روند تغییرات RMSE به ترتیب برای آمونیوم و نیترات در محدوده بین ۰/۰۰۸-۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۹-۰/۰۰۸ mg.l می‌باشد که بیانگر روند تغییرات شدید غلظت آمونیوم در امتداد پروفیل خاک است. براساس نتایج **جدول ۳** می‌توان بیان نمود مدل هایدروس ۳ بعدی به خوبی توانسته روند تغییرات غلظت هر دو نمک مورد نظر را برآورد نماید. هر چند که در برآورد روند تغییرات نیترات عملکرد بهتری نسبت به آمونیوم داشته است. از نتایج آخرین ماه نمونه‌برداری برای بررسی میزان صحت‌سنجی مدل استفاده گردید که با توجه به نتایج ارائه شده در **جدول ۳** می‌توان ذکر نمود که میزان توانایی مدل در برآورد مقدار رطوبت و دو نمک مورد مطالعه با افزایش عمق دارای روند افزایشی است. آزاد و همکاران (Azad et al., 2018) با مطالعه روند شبیه‌سازی نیترات و آمونیوم زیرکشت ذرت با مدل دو بعدی هایدروس بیان نمودند که میزان دقت مدل هایدروس در برآورد غلظت نمک‌ها با افزایش عمق دارای روند افزایشی است. نتایج تحقیق داش و همکاران (Dash et al., 2015) نیز بیانگر افزایش عملکرد مدل هایدروس در برآورد روند تغییرات نیترات و رطوبت خاک با افزایش عمق خاک است. در عمق‌های پایین تغییرات درصد رطوبت و غلظت املاح در خاک پایین است به همین دلیل در این تحقیق و سایر تحقیقات مشاهده گردید که در عمق‌های پایین روند افزایشی حاصل شد.

شبیه‌سازی رطوبت و نیترات خاک

روند تغییرات رطوبت خاک و غلظت دو نمک مورد نظر در سه عمق ۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر در **شکل ۱** ارائه شده است. با توجه به **شکل ۱** می‌توان بیان نمود که آمونیوم اضافه‌شده به خاک از طریق کوددهی جذب خاک و طی فرآیند نیتریفیکاسیون به نیترات تبدیل شده و جذب گیاه گردید. از آنجایی که کوددهی در این تحقیق به صورت سرک و به صورت تناوبی انجام شده است، از این‌رو می‌توان بیان نمود که آمونیوم دارای روند تغییرات چندانی در عمق زیرین نمی‌باشد. از سوی دیگر سبب کاهش شدید غلظت آمونیوم، در روزهایی که مدیریت مزرعه با عدم کوددهی بوده است.

روند تغییرات غلظت آمونیوم در این دوره نیز توسط مدل به خوبی شبیه‌سازی شد. در مقابل، غلظت نیترات در عمق‌های زیرین نسبت به عمق سطحی به دلیل تجمع ریشه و عمل آیشویی دارای روند افزایشی

می‌باشد. همچنین قابل ذکر است روند تغییرات غلظت هر دو نمک در امتداد پروفیل خاک حاصل کوددهی است زیرا با وجود اینکه گیاه یونجه از خانواده بقولات می‌باشد ولی به دلیل مصرف آب آبیاری با هدایت الکتریکی بالا، درصد پایین مواد آلی و عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن در خاک و از سوی دیگر اعمال روش کوددهی به صورت تناوبی سبب عدم تشکیل غدد در ریشه گیاه یونجه گیاه گردید. از این سو، نیترات موجود در خاک فقط حاصل فرآیند نیتریفیکاسیون می‌باشد. با توجه به شرایط ذکر شده و **شکل ۳**، نیترات موجود در خاک جذب گیاه گردید و همچنین با توجه به **شکل ۱** انتقال نیترات در امتداد ریشه گیاه از لایه سطحی خاک به مرز بین دو لایه که بیشترین تراکم ریشه است، رخ داده است. در حالی که تجمع نیترات طی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده نشد. شفیق و همکاران (Shafeeq et al., 2020) با مطالعه آمونیوم و نیترات در محیط ریشه گیاه گندم با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی بیان نمودند طی فرآیند کوددهی آمونیوم سریع به نیترات تبدیل گردید و طی شبیه‌سازی مدل هایدروس می‌توان روند تغییرات آمونیوم در خاک بررسی نمود. ایشان بیان نمودند که طی تبدیل آمونیوم به نیترات، تمرکز غلظت نیترات در لایه سطحی خاک است هر چند که تحت فرآیند انتقال به لایه زیرین خاک منتقل می‌گردد.

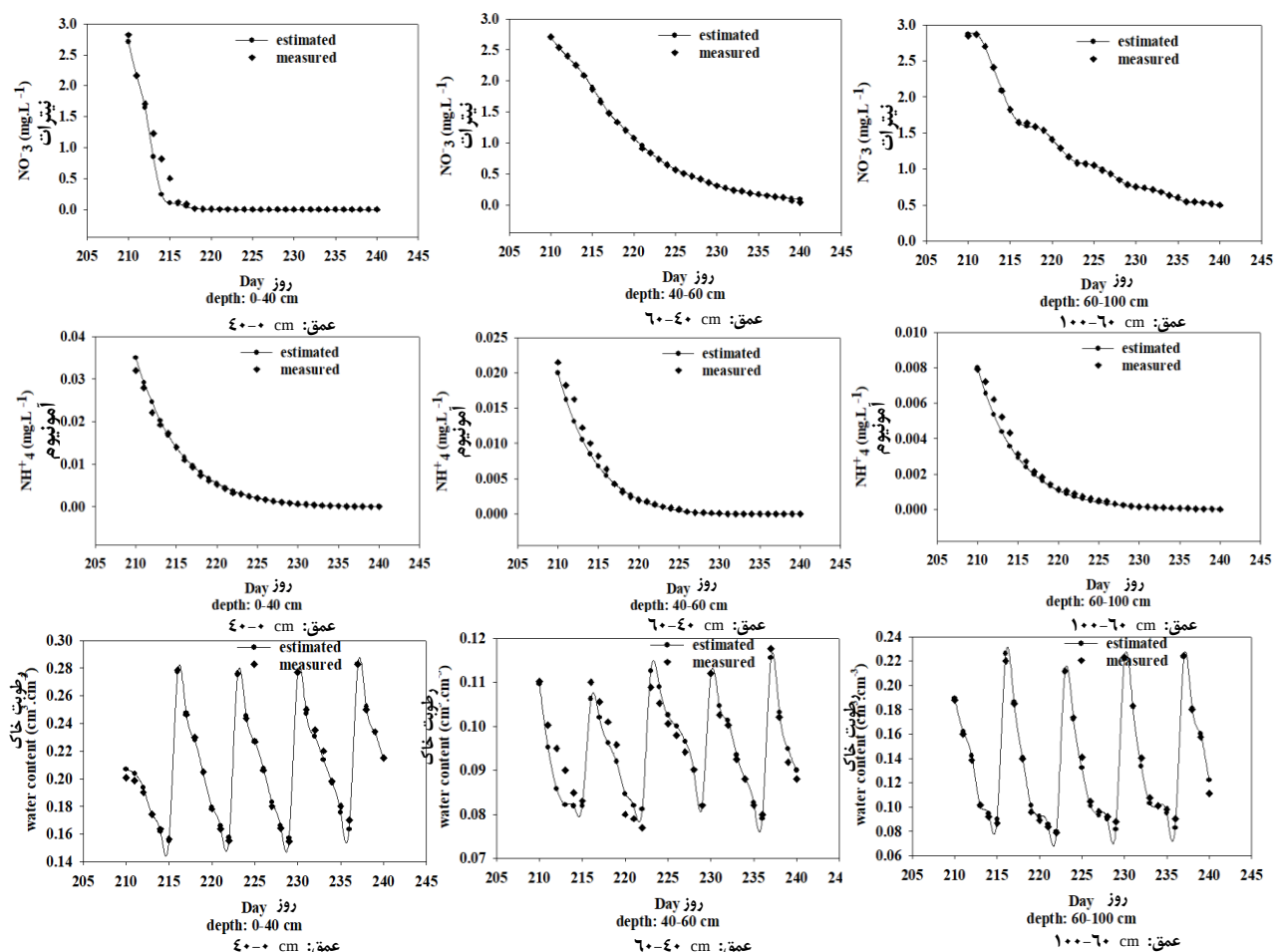
جها و همکاران (Jha et al., 2017) نیز با مطالعه انتقال نیترات تحت لایسیمتر بیان نمودند که با افزایش عمق طی آبیاری، نیترات به لایه‌های زیرین انتقال می‌یابد و سبب افزایش غلظت نیترات در لایه‌های پایینی پروفیل خاک می‌گردد. نتایج تحقیق داش و همکاران (Dash et al., 2014) نیز نشان داد که غلظت نیترات در لایه سطحی خاک روند کاهشی دارد. در مقابل در عمق ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ بر غلظت نیترات خاک افزوده می‌گردد که بیانگر فرآیند انتقال و جذب نیترات توسط گیاه در طول فصل کشت است.

شکل ۱ بیانگر روند تغییرات رطوبت خاک در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر است که در دامنه بین $cm^3 cm^{-3}$ ۰/۰-۱۵۴۶/۲۸۲۹ در حال نوسان می‌باشد. در مقابل دامنه تغییرات رطوبت در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متر بین $cm^3 cm^{-3}$ ۰/۰-۰۷۷/۱۱۷۶ حاصل شد که در مقایسه با دو عمق دیگر دارای نوسانات کمتری است ولی همان‌طور که در **شکل ۲** نشان داده شد دارای ضریب همبستگی کمتری نسبت به دو عمق سطحی و زیرین خاک می‌باشد.

نوسانات رطوبت در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری پروفیل را می‌توان به تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نسبت داد که در این عمق به دلیل تغییر بافت خاک، توزیع اندازه ذرات دستخوش تغییرات شدیدی می‌گردد. همچنین در این لایه تراکم ریشه نیز بالا است که سبب افزایش جذب آب توسط ریشه می‌شود. کیرتام و همکاران (Kirtham et al., 2019) نیز با استفاده از مدل ۳ بعدی هایدروس به شبیه‌سازی رطوبت و نیترات خاک در عمق‌های مختلف خاک پرداختند که بیانگر

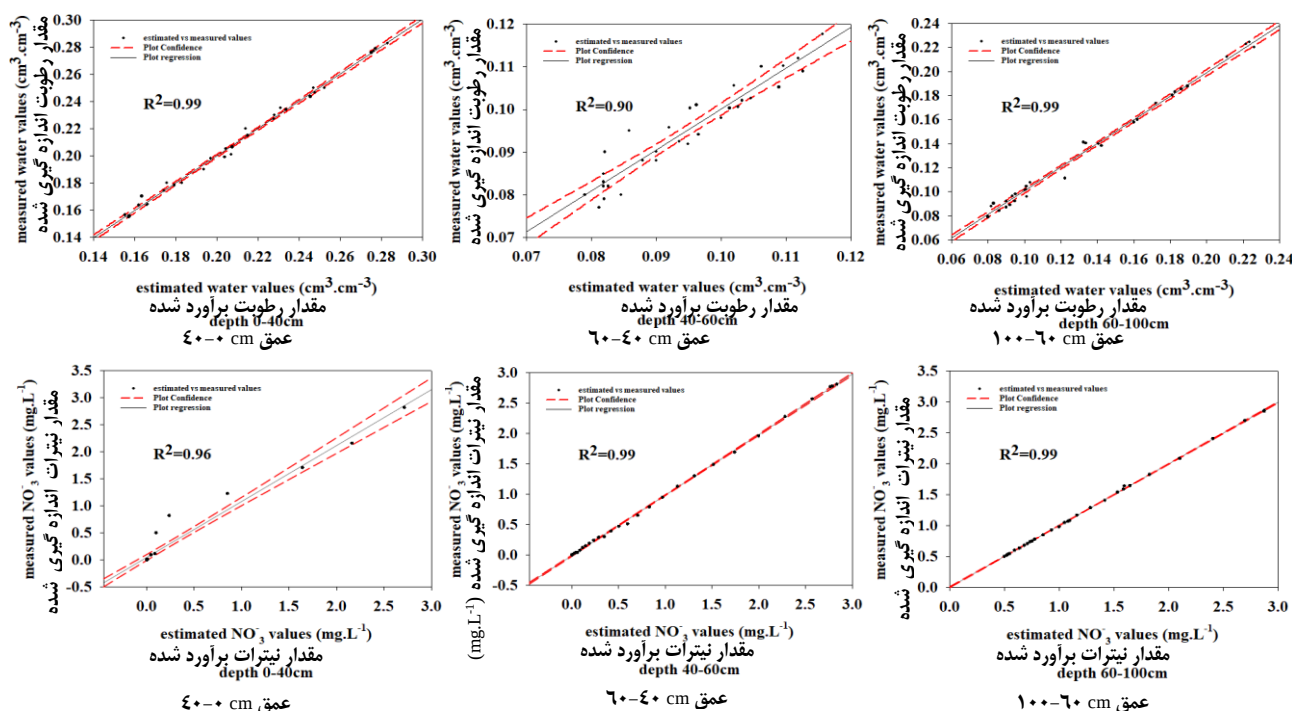
عمق سطحی (۰-۴۰ سانتی متر) می باشد. همچنین روند تغییرات در این بازه دارای نوسانات بالایی است. این روند تغییرات می توان به دلیل مصرف کود سوپر فسفات دی آمونیوم در این عمق باشد. بنابراین غلظت نیترات در این عمق طی فرآیند نیتریفیکاسیون دارای روند تغییرات بالایی است از سوی دیگر تحت فرآیند انتقال نیز می باشد. روند تغییرات غلظت نیترات در عمق ۶۰-۱۰۰ سانتی متری بیانگر فرآیند انتقال در امتداد پروفیل خاک است. هر چند که با توجه به شکل ۲ در این عمق تجمع نیترات رخ نمی دهد ولی تحت فرآیند انتقال قرار دارد. در عمق ۴۰-۶۰ سانتی متری اگرچه مقدار نیترات حاصل از اندازه گیری با مقدار نیترات شبیه سازی توسط مدل ۳ بعدی هایدروس دارای ضریب همبستگی بالایی می باشد ولی نسبت دو عمق دیگر از مقدار کمتری برخوردار است که این کاهش غلظت را می توان به جذب نیترات توسط ریشه گیاه به دلیل افزایش تراکم ریشه در این عمق و همچنین فرآیند انتقال آن نسبت داد.

توانایی مدل هایدروس ۳ بعدی در شبیه سازی رطوبت و نیترات خاک طی بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح با استفاده از الگوریتم مارکوارت- لونبرگ است. ایشان بیان نمودند روش حل معکوس نسبت به روش های آزمایشگاهی یک روش ساده و کاربردی تر در تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح با دقت بالا می باشد. نتایج تحقیق ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2012) نیز نشان داد که مدل هایدروس توانست روند تغییرات رطوبت خاک تحت روش های مختلف آبیاری به خوبی شبیه سازی نماید و همبستگی بالایی بین مقدار رطوبت اندازه گیری شده و شبیه سازی مشاهده گردید که البته این همبستگی در نتایج مدل ۲ بعدی هایدروس نسبت به مدل یک بعدی هایدروس از دقت بیشتری برخوردار بود. در شکل ۲ میزان هم پوشانی مقدار نیترات اندازه گیری شده با مقدار نیترات برآورد شده توسط مدل در عمق های مختلف با استفاده از ضریب همبستگی مورد مقایسه قرار گرفت. کمترین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶ مربوط به



شکل ۱- روند شبیه سازی رطوبت، آمونیوم و نیترات در عمق های مختلف پروفیل خاک

Figure 1- Trend of simulation soil water, ammonium and nitrate in the different soil depth



شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده غلظت نیترات و رطوبت خاک در عمق‌های مورد مطالعه
Figure 2- Comparison of the measured and simulated values of soil water and nitrate in studied soil depths.

صرف‌نظر می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده باید به این نکته توجه نمود که این مطالعه در پروفیلی متشکل از دو بافت سنگین و سبک صورت گرفت و در فرآیند مدل‌سازی با مدل هایدروس، شرایط خاک به صورت همگن فرض می‌شود و از سوی دیگر از تغییرات مکانی-زمانی صرف نظر می‌گردد که در شرایط مزرعه به‌ویژه در حالتی که پروفیل خاک از دو لایه بافت با توزیع اندازه ذرات کاملاً متفاوت تشکیل شده است، نادیده گرفتن این شرایط سبب تفاوت عملکرد مدل در فرآیند شبیه‌سازی می‌گردد.

نیتروژن گیاه

با توجه به روش کوددهی، در شکل ۳ به بررسی میزان جذب نیترات توسط ریشه گیاه پرداخته شد. نتایج شکل ۳ حاصل مدل‌سازی جذب نیترات توسط گیاه با استفاده از مدل هایدروس ۳ بعدی است. روند جذب نیترات در طی ۲ سال مدیریتی، سال دوم و چهارم پس از کشت متوالی گیاه یونجه و اعمال روش مدیریتی، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده و با استفاده از مدل هایدروس ۳ بعدی شبیه‌سازی گردید. روند جذب نیترات در شکل ۳ دارای یک نقطه عطف برای سال‌های مورد مطالعه است که مربوط به زمان کوددهی می‌باشد که با گذشت زمان طی انتقال در دوره‌های آبیاری سبب کاهش جذب نیترات توسط ریشه گیاه می‌گردد. هر چند که میزان جذب نیترات بعد از ۴ سال کشت

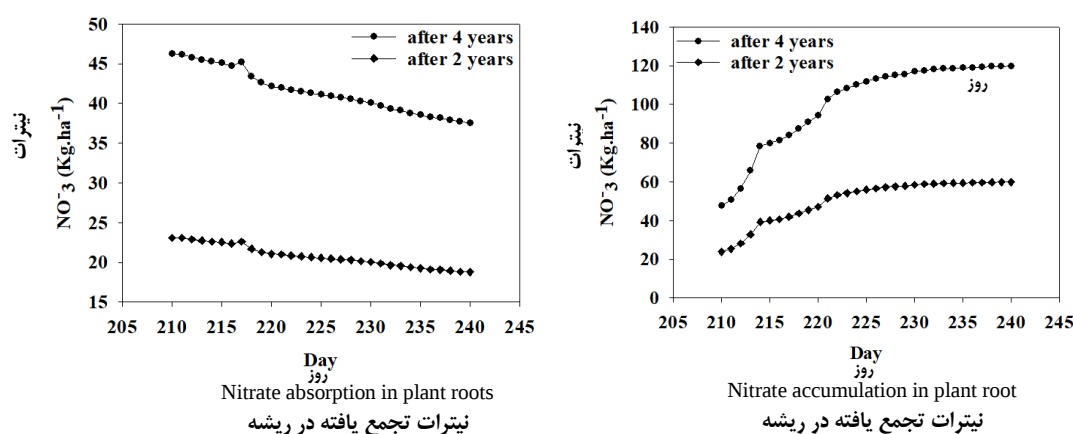
در این تحقیق ضریب توزیع (K_d) برابر با ۰/۰۰۱، توان (Beta) فروندلیچ برابر با ۱ و Nu در ساختار مدل که متناظر با پارامتر جذب سطحی لانگمویر است وقتی برابر با صفر قرار گیرد، پس از ضرایب معادله فروندلیچ در بحث فعالیت املاح در شبیه‌سازی نیترات و آمونیوم با استفاده از مدل ۳ بعدی هایدروس استفاده گردید که با توجه نتایج مطالعه کیرتام و همکاران (Kirtham et al., 2019) می‌توان بیان نمود که در نظر گرفتن معادلات جذب در بحث انتقال املاح نقش شایانی در شبیه‌سازی فرآیند آیشویی و انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک دارد و سبب افزایش دقت عملکرد مدل می‌گردد. همچنین ایشان بیان نمودند که طی کاربرد روش حل معکوس، ضریب همبستگی بین نیترات مشاهداتی با نیترات شبیه‌سازی نسبت به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیترات بر پایه روش‌های آزمایشگاهی دارای دقت بهتری می‌باشد. نتایج بررسی میزان توانایی مدل ۳ بعدی هایدروس در شبیه‌سازی رطوبت، نیترات و آمونیوم خاک نشان داد که با توجه به شاخص‌های آماری می‌توان ذکر نمود که مدل ۳ بعدی هایدروس براساس بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح توانسته است روند تغییرات رطوبت و نمک در امتداد پروفیل خاک تحت روش آبیاری سترپیوت برآورد نماید. هرچند که تفاوت‌هایی با مقادیر اندازه‌گیری شد در سطح مزرعه مشاهده می‌گردد که با توجه به روش آبیاری، نوع گیاه و مدیریت اعمال شده در سطح مزرعه این تفاوت قابل

اندازه‌گیری شده در سیستم ریشه و مقدار شبیه‌سازی شده (شکل ۴) می‌توان به کارایی مدل هایدروس ۳ بعدی اشاره نمود. راموس و همکاران (Ramos et al., 2012) نیز بیان نمودند که با افزایش دوره‌ی کوددهی سبب افزایش جذب نیتروژن به شکل نیترات توسط سیستم ریشه می‌گردد که در شکل ۴ روند افزایشی نیتروژن جذب شده در گیاه نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

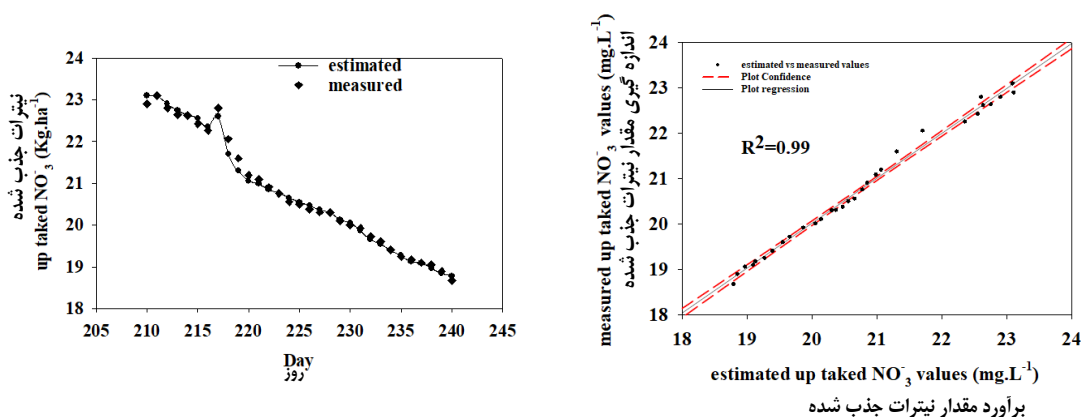
برای بررسی روند تغییرات مکانی- زمانی املاح در روش آبیاری سنتریپوت در محیط ریشه گیاه یونجه چهار ساله، شبیه‌سازی رطوبت و املاح خاک از مدل هایدروس ۳ بعدی بهره گرفته شد.

متوالی نسبت به ۲ سال کشت متوالی بیشتر می‌باشد که این افزایش جذب به توسعه و تکامل ریشه گیاه باز می‌گردد. از سوی دیگر با توسعه و افزایش تراکم ریشه در عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متری در یک بافت سبک به دلیل ویژگی‌های هیدرولیکی یک خاک سبک انتظار می‌رود که میزان انتقال نیترات خاک افزایش گردید که منجر به خارج شدن نیترات در محیط سیستم ریشه‌ای گیاه می‌شود. نتایج تحقیق شاهرخیان و سپاسخواه (Shahrokhnia & Sepaskhah, 2018) نیز نشان داد میزان نیتروژن جذب شده در اندام گیاه در نیمه دوم مرحله رشد دارای روند افزایشی است. ایشان بیان نمودند که با توسعه و تکامل سیستم ریشه سبب افزایش جذب نیتروژن در ریشه اندام هوایی گیاه می‌گردد. همچنین روند تغییرات نتایج ایشان با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل هایدروس بیانگر دقت و کارایی مدل هایدروس در برآورد مقدار نیتروژن ذخیره شده در گیاه است. در این تحقیق نیز با مقایسه نیتروژن



شکل ۳- روند جذب و تجمع نیترات در ریشه گیاه در دو سال مدیریتی

Figure 3- Nitrate absorption and accumulation process in plant roots in two management years.



شکل ۴- روند تغییرات نیترات جذب شده توسط گیاه و میزان همبستگی آن با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل ۳ بعدی هایدروس
Figure 4- Variation trend of nitrate uptake by plant and correlation between the measured and simulated values by HYDRUS model-3D

با انجام کوددهی در طی چهار سال زمینه برای جذب و تجمع نیترات در سطح ریشه گیاه فراهم می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل مدل هایدروس ۳ بعدی می‌توان ذکر نمود که نتایج به‌دست آمده از روش حل معکوس برپایه Marquardt-Levenberg optimization algorithm به‌خوبی توانسته است میزان روند تغییرات رطوبت خاک، آمونیوم و نیترات طی روش آبیاری سنتریپوت به خوبی شبیه‌سازی نماید. با توجه به اینکه این مطالعه در یک بازه طولانی مدت صورت گرفته است، پس الگوریتم بهینه‌ساز Marquardt-Levenberg کارایی لازم و قابلیت ارزیابی تغییرات مورد نظر در این بازه داشته و به خوبی توانسته به بررسی روند تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در حضور گیاه در حال رشد بپردازد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد کاربرد روش‌های نوین آبیاری، روش آبیاری سنتریپوت، می‌تواند یک راه حل مناسب مدیریتی برای حل مسئله کاهش منابع آبی طی خشکسالی و تغییر اقلیم در نظر گرفت.

روند واسنجی مدل ۳ بعدی هایدروس در این تحقیق در فرآیند شبیه‌سازی نشان داد که در بحث رطوبت خاک با $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $\text{RMSE} = 0.004$ در عمق $0-40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $\text{RMSE} = 0.0049$ به‌ترتیب در عمق‌های $40-60$ و $60-100 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ مدل به‌خوبی توانسته است روند تغییرات رطوبت خاک را تحت روش آبیاری سنتریپوت شبیه‌سازی کند. دامنه تغییرات نشان‌دهنده کارایی مدل هایدروس ۳ بعدی در بررسی روند انتقال املاح خاک است. مقایسه مقدار شبیه‌سازی نیترات توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی ارزیابی گردید که بیانگر ضریب همبستگی برابر با 0.96 و 0.99 به‌ترتیب در عمق $0-40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و دو عمق $40-60$ و $60-100 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ است. روند شبیه‌سازی جذب و تجمع نیترات در گیاه در مدل هایدروس ۳ بعدی بیانگر روند افزایشی در پایان سال چهارم است که با توسعه و تکامل ریشه و از سوی دیگر

References

1. Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Abbasi, F., & Navabian, M. (2018). Evaluation of fertigation management impacts of surface drip irrigation on reducing nitrate leaching using numerical modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 36499-36514. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06699-2>
2. Baram, S., Couvreur, V., Harter, T., Read, M., Brown, P. H., Kandelous, M., & Hopmans, J.W. (2016). Estimating nitrate leaching to groundwater from orchards: comparing crop nitrogen excess, deep vadose zone data-driven estimates, and HYDRUS modeling. *Vadose Zone Journal*, 15(11), 125-142. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.07.0061>
3. Cai, G., Vanderborght, J., Couvreur, V., Mboh, C.M., & Vereecken, H. (2018). Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 110-128. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0125>
4. Dash, C.J., Sarangi, A., Singh, D.K., Singh, A.K., & Adhikary, P.P. (2015). Prediction of root zone water and nitrogen balance in an irrigated rice field using a simulation model. *Paddy and Water Environment*, 13(3), 281-290.
5. Deb, S.K., Shukla, M.K., Šimůnek, J., & Mexal, J.G. (2013). Evaluation of spatial and temporal root water uptake patterns of a flood-irrigated pecan tree using the HYDRUS (2D/3D) model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8), 599-611. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000611](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000611)
6. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F., & Navabian, M. (2012). Comparison of one-and two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10), 929-938. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000482](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000482)
7. Eardly, B.D., Hannaway, D.B., & Bottomley, P.J. (1985). Nitrogen nutrition and yield of seedling alfalfa as affected by ammonium nitrate fertilization 1. *Agronomy Journal*, 77(1), 57-62. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700010014x>
8. Ghazouani, H., Autovino, D., Rallo, G., Douh, B., & Provenzano, G. (2016). Using Hydrus-2D model to assess the optimal drip lateral depth for Eggplant crop in a sandy loam soil of central Tunisia. *Italian Journal Agrometeorology*, 1, 47-58. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2015024>
9. Golmohammadi, F. (2014). Saffron and its farming, economic importance, export, medicinal characteristics and various uses in South Khorasan Province-East of Iran. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 3(5), 566-596.
10. Hannaway, D.B., & Shuler, P.E. (1993). Nitrogen fertilization in alfalfa production. *Journal of Production Agriculture*, 6(1), 80-85. <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0080>
11. Hanson, B.R., Šimůnek, J., & Hopmans, J.W. (2006). Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013>
12. He, Y., Hu, K.L., Wang, H., Huang, Y.F., Chen, D.L., Li, B.G., & Li, Y. (2013). Modeling of water and nitrogen

- utilization of layered soil profiles under a wheat–maize cropping system. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4), 596-605. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.060>
13. Hopmans, J.W., Šimůnek, J., Romano, N., & Durner, W. (2002). 3.6. 2. Inverse Methods. *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods*, 5, 963-1008. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4c40>
14. Jha, R.K., Sahoo, B., & Panda, R.K. (2017). Modeling the water and nitrogen transports in a soil–paddy–atmosphere system using HYDRUS-1D and lysimeter experiment. *Paddy and Water Environment*, 15(4), 831-846. <https://doi.org/10.1007/s10333-017-0596-9>
15. Kirkham, J.M., Smith, C.J., Doyle, R.B., & Brown, P.H. (2019). Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). *Peer Journal*, 6, e6002. <https://doi.org/10.7717/peerj.6002>
16. Liu, H.L., Yang, J.Y., Tan, C.S., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Zhang, T.Q., & Hoogenboom, G. (2011). Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1105-1111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.017>
17. Mallants, D., Karastanev, D., Antonov, D., & Perko, J. (2007, January). *Innovative in-situ determination of unsaturated hydraulic properties in deep Loess sediments in North-West Bulgaria*. In The 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (pp. 733-739). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/ICEM2007-7202>
18. Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
19. Morianou, G., Karatzas, G.P., Arampatzis, G., Pisinaras, V., & Kourgialas, N.N. (2025). Assessing soil water dynamics in a drip-irrigated grapefruit orchard using the HYDRUS 2D/3D model: A comparison of unimodal and bimodal hydraulic functions. *Agronomy*, 15(2), 504. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020504>
20. Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
21. Nakasone, H., Abbas, M.A., & Kuroda, H. (2004). Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 2(3), 115-124. <https://doi.org/10.1007/s10333-004-0050-7>
22. Nash, J.E. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principle. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
23. Rallo, G., Baiamonte, G., Juárez, J.M., & Provenzano, G. (2014). Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: application for olive groves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(9), A4014001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000693](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000693)
24. Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., & Pereira, L.S. (2012). Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111, 87-104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.007>
25. Rana, B., Parihar, C.M., Nayak, H.S., Patra, K., Singh, V.K., Singh, D.K., & Jat, M.L. (2022). Water budgeting in conservation agriculture-based sub-surface drip irrigation using HYDRUS-2D in rice under annual rotation with wheat in Western Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research*, 282, 108519. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108519>
26. Ravikumar, V., Vijayakumar, G., Šimůnek, J., Chellamuthu, S., Santhi, R., & Appavu, K. (2011). Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. *Agricultural Water Management*, 98(9), 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.012>
27. Salehi, A.A., Navabian, M., Varaki, M.E., & Pirmoradian, N. (2017). Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 15(2), 433-442. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0561-z>
28. Shafeeq, P.M., Aggarwal, P., Krishnan, P., Rai, V., Pramanik, P., & Das, T.K. (2020). Modeling the temporal distribution of water, ammonium-N, and nitrate-N in the root zone of wheat using HYDRUS-2D under conservation agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2197-2216. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06642-5>
29. Shahrokhnia, M.H., & Sepaskhah, A.R. (2018). Water and nitrate dynamics in safflower field lysimeters under different irrigation strategies, planting methods, and nitrogen fertilization and application of HYDRUS-1D model. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8563-8580. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1184-7>
30. Silva Ursulino, B., Maria Gico Lima Montenegro, S., Paiva Coutinho, A., Hugo Rabelo Coelho, V., Cezar dos Santos Araújo, D., Cláudia Villar Gusmão, A., & Angulo-Jaramillo, R. (2019). Modelling soil water dynamics from soil hydraulic parameters estimated by an alternative method in a tropical experimental basin. *Water*, 11(5), 1007. <https://doi.org/10.3390/w11051007>
31. Šimůnek, J., Jacques, D., Langergraber, G., Bradford, S.A., Šejna, M., & Van Genuchten, M.T. (2013). Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. *Journal Indian Inst. Science*, 93(2), 265-284. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10247>

32. Turkeltaub, T., Kurtzman, D., & Dahan, O. (2016). Real-time monitoring of nitrate transport in the deep vadose zone under a crop field—implications for groundwater protection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3099-3108. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3099-2016>
33. Turkeltaub, T., Kurtzman, D., Russak, E.E., & Dahan, O. (2015). Impact of switching crop type on water and solute fluxes in deep vadose zone. *Water Resources Research*, 51(12), 9828-9842. <https://doi.org/10.1002/2015WR017612>
34. Viers, J.H., Liptzin, D., Rosenstock, T.S., Jensen, V.B., Hollander, A.D., McNally, A., & Fryjoff-Hung, A., HE Canada, S., Laybourne, C., McKenney, J., Darby, Quinn, JF., & Harter, T. (2012). Nitrogen sources and Loading to Groundwater. *Addressing Nitrate in California's Drinking Water with a Focus on Tulare Lake Basin and Salinas Valley Groundwater, Technical Report*, 2, 37-56. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0411>
35. Vrugt, J.A., & Bouten, W. (2002). Validity of first-order approximations to describe parameter uncertainty in soil hydrologic models. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1740-1751. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1740>
36. Wang, H., Ju, X., Wei, Y., Li, B., Zhao, L., & Hu, K. (2010). Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1646-1654. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.022>
37. Wang, X., Huang, G., Yang, J., Huang, Q., Liu, H., & Yu, L. (2015). An assessment of irrigation practices: Sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 159, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.011>
38. Wöhling, T., Vrugt, J.A., & Barkle, G.F. (2008). Comparison of three multiobjective optimization algorithms for inverse modeling of vadose zone hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 305-319. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0176>

Evaluation of the Effects of Monopotassium Phosphate and Cow Manure on Phosphorus Dynamics and Soil Chemical Properties

A. Barvar¹, N. Boroomand^{1*}, M. Hejazi-Mehrizi¹, M. Sadat Hosseini²

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: n.broomand@uk.ac.ir)

2- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

Received: 21 May 2025

Revised: 11 August 2025

Accepted: 19 August 2025

Available Online: 19 August 2025

How to cite this article:

Barvar, A., Boroomand, N., Hejazi Mehrizi, M., & Sadat Hosseini, M. (2025). Evaluation of the effects of monopotassium phosphate and cow manure on phosphorus dynamics and soil chemical properties. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 275-289. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93603.1483>

Introduction

Phosphorus as a vital nutrient for plant growth and development, contributes significantly to processes like photosynthesis, energy production, and root development. In soil, phosphorus mainly exists as phosphate, though much of it is not accessible to plants. There are several methods for providing phosphorus to plants: such as chemical, organic, and combination of chemical and organic phosphorus fertilizers. The chemical fertilizers rapidly supply plants with absorbable phosphorus. However, excessive use of the fertilizer can degrade soil quality and cause environmental pollution. Manure and compost as organic fertilizers release phosphorus slowly in the soil. In addition to providing phosphorus, they enhance the chemical and biological properties of the soil. Using combination of chemical and organic fertilizers can increase phosphorus availability, promote soil health, and improve the sustainability of agricultural production. Given the importance of understanding the various forms of phosphorus in the soil for better plant nutrient management, as well as evaluating the combined application of different levels of chemical fertilizers and animal manure on the different forms of phosphorus, this study was conducted to examine the impact of these two phosphorus sources on its dynamics in the soil.

Materials and Methods

To investigate the effects of mono-potassium phosphate (MKP) fertilizer on various forms of phosphorus in soil, a completely randomized factorial experimental design was conducted. The treatments included four levels of MKP fertilizer (0, 70, 140, and 210 kg ha⁻¹) and two levels of cow manure (0 and 40 tons ha⁻¹). The impacts of the treatments on soil electrical conductivity (EC), pH, organic carbon (OC), and different phosphorus (P) fractions (water-extractable, NaOH-extractable, HCl-extractable, NaHCO₃-extractable, Olsen-P, and residual P) were examined. After harvesting, soil samples were taken from a depth of 20 cm below the initial fertilizer application site to examine the different fractions of soil phosphorus. A composite soil sample was taken from each treatment and after being transported to the laboratory, air-dried and passed through a 2 mm sieve.

Results and Discussion

Overall, the results indicated that the addition of MKP and cow manure increased the soil EC and organic matter content. MKP fertilizer and cow manure significantly influenced various P fractions in the soil. Organic carbon content notably increased in the presence of cow manure. However, the interaction of high levels of phosphorus and cow manure resulted in a decrease in soil electrical conductivity (EC). The highest and lowest P concentrations were observed in the water-extractable fraction and residual P fraction, respectively. Organic matter predominantly enhanced the concentration of various P fractions, particularly water-soluble P. Organic matter



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93603.1483>

exhibited a positive and significant correlation with water-extractable P (0.57), NaHCO_3 -extractable P (0.44), NaOH-extractable P (0.44), and HCl-extractable P (0.6). The most pronounced effect of organic matter was on the water-extractable fraction, where its interaction with the MKP levels of 0, 70, 140, and 210 kg ha⁻¹ resulted in respective increases of 35%, 51%, 36%, and 62% compared to the control. The inclusion of manure in the soil boosts the levels of available, water-extractable phosphorus, as well as phosphorus extractable with bicarbonate and sodium, and also increases residual phosphorus. Furthermore, higher levels of monopotassium phosphate fertilizer enhance soil electrical conductivity and extractable phosphorus. However, in some instances, such as with acid-soluble phosphorus, they can lead to a decrease in the concentration. In general, the combined application of manure and monopotassium phosphate improved soil phosphorus content; however, their impact on other soil properties, such as pH and organic carbon may vary.

Conclusion

The simultaneous use of chemical and organic fertilizers can had a significant positive effect on the availability of phosphorus in the soil. As highlighted in the text, animal manure enhanced phosphorus availability to plants due to its phosphorus content and its influence on soil phosphorus solubility. Additionally, the observed sequence of phosphorus concentrations in different soil fractions (water > sodium > bicarbonate > acid > residue) reflected the distinct effects of these phosphorus sources, which, when combined, can improve the availability of this nutrient. Another important consideration was the need for further research to determine the optimal levels of these fertilizers. This would help identify the most effective combination and application rates for improving soil fertility and boosting agricultural productivity. Overall, such studies enable farmers and researchers to develop more effective strategies for managing phosphorus in soil, thereby contributing to the maintenance of soil health and higher agricultural yields.

Keywords: Cow manure, Mono-potassium phosphate, Olsen P, Organic carbon, Phosphorus

ارزیابی اثرات مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر پویایی فسفر و ویژگی‌های شیمیایی خاک

افسانه برور^۱ - ناصر برومند^{۱*} - مجید حجازی مهریزی^۱ - محمد سادات حسینی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

فسفر یکی از عناصر غذایی کلیدی در خاک به شمار می‌رود و مطالعه تأثیر کودهای فسفره بر نحوه توزیع و تحرک آن در خاک، می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف کود، ارتقاء عملکرد محصولات کشاورزی، و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از کاربرد بیش از حد کودهای شیمیایی ایفا کند. به‌منظور بررسی تأثیر مصرف کود مونوپتاسیم فسفات و کود آلی بر اشکال مختلف فسفر در خاک، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. تیمارها شامل چهار سطح کود مونوپتاسیم فسفات (صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) و دو سطح کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) بود. تأثیر تیمارهای مورد مطالعه بر میزان هدایت الکتریکی، pH، کربن آلی و اشکال مختلف فسفر در خاک (فرم قابل استخراج با آب و سود و اسید کلریدریک و بی‌کربنات، فسفر اولسن و فسفر باقیمانده) بررسی شد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن مونوپتاسیم فسفات و کود گاوی به خاک سبب افزایش میزان هدایت الکتریکی و ماده آلی خاک شد. نتایج نشان داد که کود مونوپتاسیم فسفات باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی (تا ۴۹/۲ واحد) و کود دامی موجب افزایش کربن آلی خاک تا ۱،۷۴ درصد شد. حضور کود دامی در سطح ۲۱۰ کیلوگرم کود شیمیایی موجب کاهش هدایت الکتریکی نسبت به کاربرد تنها کود شیمیایی شد. بیشترین مقدار فسفر در بخش قابل استخراج با آب (Water-P) مشاهده شد که با کاربرد هم‌زمان کود دامی و فسفر شیمیایی، نسبت به شاهد، به‌ترتیب تا ۳۵، ۵۱، ۳۶/۹ و ۶۲/۱ درصد افزایش یافت. فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات (NaHCO₃-P) نیز در حضور کود دامی تا ۲۸/۳ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. در مقابل، فسفر قابل حل در اسید کلریدریک (HCl-P) با افزایش سطح فسفر کاهش یافت؛ به‌ویژه در سطح ۲۱۰ کیلوگرم کود، نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری مشاهده شد. فسفر باقیمانده (Residual-P) نیز با کاربرد ۲۱۰ کیلوگرم فسفر و کود دامی، تا ۴۸،۵ درصد افزایش یافت. همبستگی معنی‌داری بین کربن آلی و فسفرهای قابل استخراج با آب ($r=0.57$) و اسید کلریدریک ($r=0.60$) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: فرکشن‌بندی فسفر، فسفر محلول در آب، کود آلی، فسفر اولسن

(Bennett, 2016).

مقدمه

در کشاورزی پیشرفته، کشاورزان از کودهای شیمیایی فسفات برای افزایش رشد و عملکرد محصول استفاده می‌کنند. استفاده بیش از حد کودهای فسفره باعث تجمع بیش از حد فسفر در خاک می‌شود (Jiang *et al.*, 2021). مطالعات نشان داده که تنها ۱۰ تا ۲۰ درصد از کل فسفر اعمال شده به خاک توسط گیاهان جذب می‌شود (Helfenstein *et al.*, 2018). بخشی از فسفر وارد شده توسط کودها پس از آیشویی

فسفر (P) یک عنصر غذایی پرمصرف اساسی است که برای رشد و توسعه بهینه گیاه در بخش کشاورزی مورد نیاز است (Wahid *et al.*, 2020). فراهمی فسفر یک مسئله جدی است و عامل اصلی محدود کننده کاهش عملکرد محصول در اکوسیستم کشاورزی مدرن در نظر گرفته می‌شود (Metson, MacDonald, Haberman, Nesme, &

۱- گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*)- نویسنده مسؤل: Email: n.broomand@uk.ac.ir

۲- گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

از خاک خارج و وارد آب شده و بر کیفیت آن تأثیر می‌گذارد. مطالعات مختلف همچنین گزارش دادند که استفاده از مقادیر زیاد کودهای شیمیایی فسفر ممکن است سبب کاهش فراهمی عناصر غذایی ضروری مانند آهن، منگنز و روی شده (Fan, Zhou, Chen, Tang, & Xie, 2021) و این به نوبه خود جذب این عناصر توسط گیاهان را کاهش می‌دهد (Montalvo, Degryse, Da Silva, Baird, & McLaughlin, 2016). از بین کودهای مختلف فسفره، اخیراً مونوپتاسیم فسفات (KH_2PO_4) به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان منبع فسفر و پتاسیم در تولید محصولات باغی مورد استفاده قرار گرفته است (Meng, Xu, Dong, Wang, & Wang, 2017). با این حال، تفاوت قابل توجهی در مقدار توصیه شده و میزان کاربرد در خاک وجود داشته و در برخی موارد، اختلاف بیش از ده برابری در این مقدار گزارش شده است (Zhao & Tao, 2015).

کودهای آلی با تأمین همزمان ماده آلی و عناصر غذایی و بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، می‌تواند نقش مهمی در بهبود خاک ایفا کند (Xiong et al., 2018). در مقایسه با کود شیمیایی، افزودن کودهای آلی به خاک می‌تواند علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک، میزان کربن آلی را نیز افزایش داده که این امر به‌عنوان یک عامل کلیدی در تعیین خواص و بهره‌وری خاک مورد استفاده قرار گیرد (Qiu, Wang, Huang, & Lin, 2014; Wang et al., 2017). فسفر موجود در ترکیبات آلی از یک طرف کاهش میزان اسیدیته خاک در پی آزاد شدن اسیدهای آلی در زمان تجزیه این مواد و از طرف دیگر سبب افزایش غلظت فسفر قابل دسترس در خاک می‌شود (Martins, Santos, Almeida, & Costa, 2008). کود گاوی منبع مناسب فسفر برای محصولات کشاورزی (Singh, Pandey, & Singh, 2011) و یک منبع جایگزین عالی برای کود شیمیایی فسفر است. استفاده از کود دامی در ترکیب با کود شیمیایی فسفر باعث افزایش فراهمی فسفر و بهبود عملکرد محصول می‌شود (Li et al., 2017; Tian et al., 2013). در مورد تأثیر استفاده از کودهای آلی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک، کاهش میزان اسیدیته (Mahmood et al., 2017)، افزایش ۴۴ درصدی ماده آلی خاک (Gangwar, Singh, Sharma, & Tomar, 2006) و افزایش فراهمی عناصر غذایی (Chiu, Ye, & Wong, 2006) گزارش شده است. از طرفی با توجه به اهمیت تأثیر میزان pH خاک و همچنین محتوای ماده آلی بر فراهمی و رفتار عنصر فسفر در خاک (Jindo et al., 2023)، به نظر می‌رسد که استفاده از کودهای آلی بر میزان فراهمی و همچنین فرم‌های مختلف این عنصر تأثیرگذار باشند.

به‌منظور مدیریت منطقی فسفر از دیدگاه حاصلخیزی و تغذیه گیاه و زیست‌محیطی؛ آگاهی از اشکال مختلف این عنصر در خاک ضروری به نظر می‌رسد (Cordell, Drangert, & White, 2009). چرا که این اطلاعات برای تشخیص فراهمی زیستی و تحرک فسفر در خاک مهم است (González Medeiros, Pérez Cid, & Fernández, 2015).

در مقایسه با منابع شیمیایی فسفر، منابع کود آلی برای تبدیل فسفر غیرقابل دسترس به فسفر قابل دسترس گیاه مفید هستند (Chen et al., 2021). این منابع جایگزین فسفر همچنین می‌توانند با تغییر ظرفیت جذب بر سینتیک فسفر در خاک تأثیر بگذارند (Gatiboni et al., 2019). جلالی و رنجبر (Jalali & Ranjbar, 2010) گزارش کردند که واکنش فسفر افزوده شده به خاک‌های آهکی کاملاً سریع بوده و بخش محلول در آب به‌دلیل ظرفیت جذب بالای خاک در مدت‌زمان بسیار کوتاهی افزایش قابل توجهی داشت. ابوالفضلی و همکاران (Abolfazli, Forghani, & Norouzi, 2012) تأثیر منابع مختلف آلی و شیمیایی فسفر بر اشکال مختلف این عنصر در خاک آهکی را بررسی و گزارش کردند که استفاده از منابع شیمیایی و آلی به‌صورت به‌صورت همزمان بر فسفر اولسن بیشترین تأثیر را داشت. بررسی اثر افزودن فسفر بر بخش‌های مختلف فسفر در خاک برای درک عرضه و پویایی فسفر خاک در زمین‌های کشاورزی مهم است. افزودن مقادیر مختلف فسفر به خاک از طریق کودهای شیمیایی بالطبع بر اشکال مختلف این عنصر تأثیرگذار می‌باشد. حال در کنار افزودن منابع شیمیایی، کاربرد منابع آلی همانند کود دامی نیز می‌تواند بر رفتار و اشکال مختلف این عنصر غذایی پرمصرف در خاک مؤثر باشد. با توجه به نقش کلیدی فسفر در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه، بهینه‌سازی مدیریت تغذیه فسفری خاک، به‌ویژه در شرایط کم‌بازدهی منابع، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در کشاورزی پایدار به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با تمرکز بر برهم‌کنش سطوح مختلف کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی، به‌دنبال درک عمیق‌تری از رفتار اشکال مختلف فسفر در خاک و اثرات متقابل مواد آلی و معدنی در بهبود فراهمی این عنصر حیاتی است. اهمیت این مطالعه از آن‌جا ناشی می‌شود که برخلاف رویکردهای متداول که تنها بر فسفر اولسن تمرکز دارند، در این پژوهش از رویکرد جامع فرکشن‌بندی استفاده خواهد شد تا همه اشکال فعال و غیرفعال فسفر مورد بررسی قرار گیرد. نوآوری اصلی این تحقیق در ارزیابی هم‌زمان اثر کود شیمیایی و ماده آلی بر توزیع اشکال مختلف فسفر (از جمله فسفر قابل استخراج با آب، بی کربنات، سود، اسید کلریدریک و فسفر باقیمانده) و تحلیل دقیق تعامل

آن‌ها با کربن آلی و pH خاک نهفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق اثر کاربرد مقادیر مختلف کود مونوپتاسیم فسفر و کود گاوی بر اشکال مختلف این عنصر در خاک باغ‌های پسته واقع در کاظم آباد استان کرمان با مختصات جغرافیایی ۲۹° ۳۴' ۳۰" و ۵۸° ۴۸' ۴۶" مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در قالب یک طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار سطح کود مونوپتاسیم فسفات (صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار) و کود گاوی (صفر و ۳۰ تن در هکتار) با سه تکرار بودند. زمین مورد مطالعه باغ پسته بوده که تیمارهای کودی (شامل سولفات پتاسیم و همچنین فرم سولفات عناصر میکرو شامل آهن و مس و منگنز و روی) در زمستان و تا اواخر بهمن‌ماه سال ۱۴۰۰ اعمال گردیدند. لازم به ذکر است که تمامی کودهای فوق به‌جز کودهای نیتروژنی در زمستان و در محل سایه‌انداز درختان به خاک اضافه شدند. کود سولفات آمونیوم از اوایل اردیبهشت‌ماه به همراه آب آبیاری و در چند نوبت مصرف شد. کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی به‌صورت سطحی در خاک پخش شدند (مونوپتاسیم فسفات در پنج سانتی‌متری سطح خاک جایگذاری شد).

پس از برداشت محصول نسبت به نمونه‌برداری خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متر پایین‌تر از محل کارگذاری اولیه کود جهت بررسی بخش‌های مختلف فسفر خاک اقدام گردید. از هر تیمار یک نمونه خاک مرکب برداشت شده و پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل pH در گل اشباع (Thomas, 1996)، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع

(Rhoades, 1996) و کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب (Wakley & Black, 1934) اندازه‌گیری شدند. اشکال مختلف فسفر در خاک به روش (Hedley, Stewart, & Chauhan, 1982) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). در ضمن فسفر قابل دسترس خاک با استفاده از روش اولسن (محلول ۰/۵ نرمال بی‌کربنات سدیم در pH 8.5) استخراج گردید (Olsen, 1954).

میزان فسفر در عصاره‌ها پس از عصاره‌گیری توسط روش مورفی و ریلی (Murphy & Riley, 1962) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و در طول موج ۶۶۰ نانومتر قرائت شد. درنهایت نتایج به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار SPSS 19 تجزیه و تحلیل شده و برای مقایسه میانگین نیز از آزمون Tukey و در سطح احتمال معنی‌داری ۹۵ درصد استفاده شد. برای بررسی همبستگی بین پارامترها نیز از روش پیرسون استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه و تحلیل برخی از خصوصیات شیمیایی خاک‌ها در جدول ۱ بیان شده‌اند. لازم به ذکر است که بافت خاک‌ها نیز clay بود (جدول ۲).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات ساده سطوح کود مونوفسفات پتاسیم و برهمکنش مونوپتاسیم و ماده آلی بر pH خاک به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار بود. اثرات ساده و متقابل این تیمارها بر سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۱- خلاصه روش اندازه‌گیری اشکال شیمیایی فسفر در خاک

Table 1- Summary of the method of measuring the chemical forms of phosphorus in the soil

بخش Fraction	نوع فسفر Phosphorus type	روش عصاره‌گیری Extraction method
1	Water-P	به ۰/۵ گرم خاک ۱۵ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه کرده و پس از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To 0.5 g of soil, 15 mL of distilled water was added, and extraction was carried out after 16 hours.
2	NaHCO ₃ -P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار با pH 8.2 اضافه کرده و بعد از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 0.5 M sodium bicarbonate (pH 8.2) was added, and extraction was carried out after 16 hours.
3	NaOH-P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۰/۵ مولار اضافه شده و پس از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 0.5 M sodium hydroxide was added, and extraction was carried out after 16 hours.
4	HCl-P	به خاک مرحله قبل ۱۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۱ مولار اضافه شده و بعد از ۱۶ ساعت عصاره‌گیری شد. To the soil from the previous step, 15 mL of 1 M hydrochloric acid was added, and extraction was carried out after 16 hours.
5	Residual-P	به خاک باقیمانده ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۱ میلی‌لیتر پرکلریک اسید اضافه شده و پس از ۱۶ ساعت حرارت داده شده و عصاره‌گیری شدند. To the remaining soil, 3 mL of concentrated nitric acid and 1 mL of perchloric acid were added, then heated for 16 hours, and extraction was carried out.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی اولیه خاک‌ها

Table 2- Result of initial chemical analysis of soils

پارامتر Parameters	P210OM1	P210OM0	P140OM1	P140OM0	P70OM1	P70OM0	P0OM1	P0OM0
کربنات کلسیم معادل Calcium Carbonate equivalent (percent)	18.5	22	17.5	22.5	18	20.5	15.5	22.5
نیتروژن کل Total nitrogen (percent)	727	312	658	419	1089	472	955	423
پتاسیم قابل دسترس Available potassium (mg.kg ⁻¹)	370	216	385	295	340	285	310	380

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 3- Variance analysis of the effect of experimental treatments on soil chemical properties

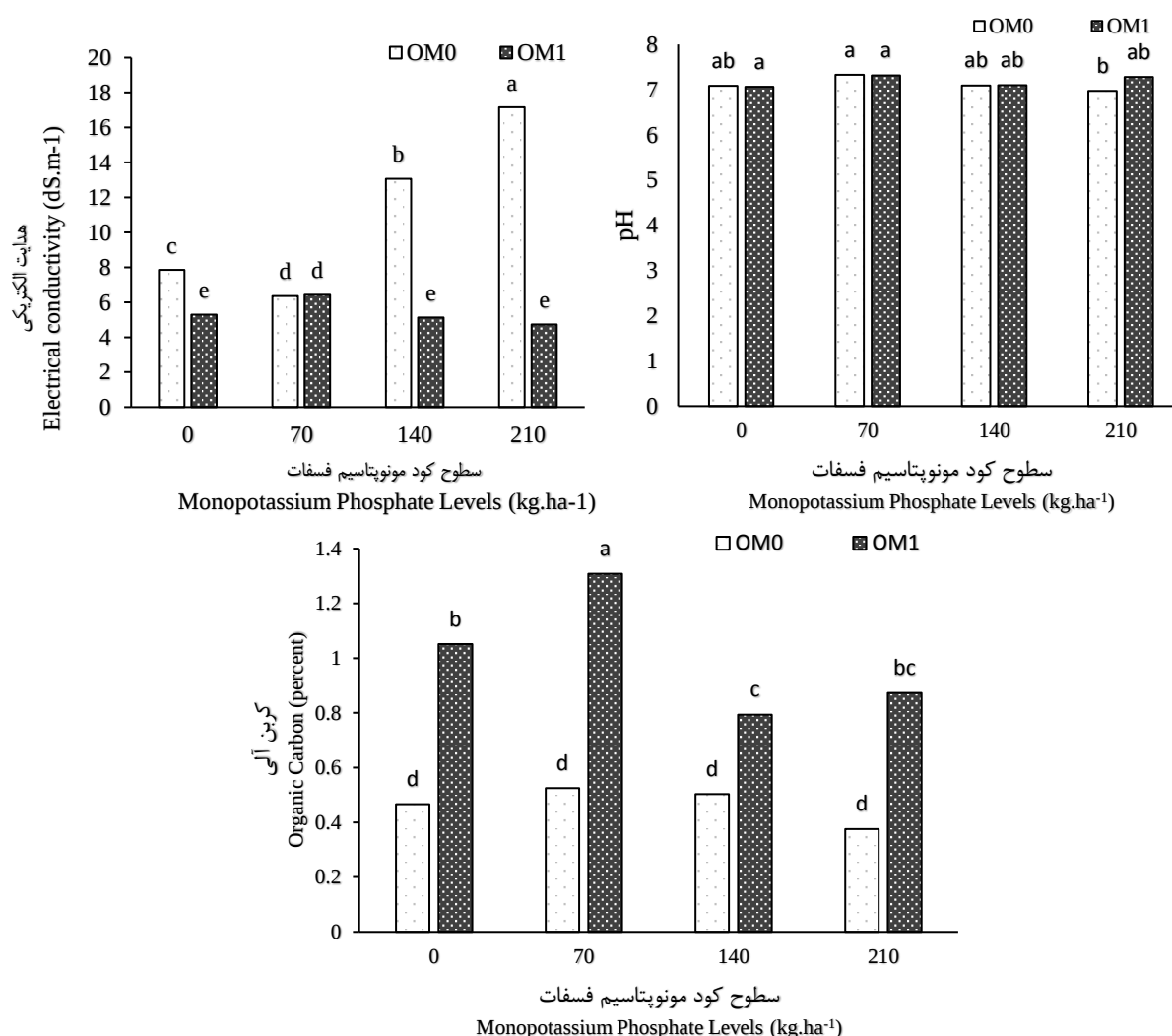
منابع تغییرات Sources of variances	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares								اسیدیته خاک Soil pH
		Residual-P	HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	Olsen-P	کربن آلی Organic matter	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	
سطوح فسفر P levels	3	10522**	396.4**	587.4**	928.4**	17.9**	4481**	0.106**	28.49**	0.077**
ماده آلی Organic matter	1	12382**	396.2**	3440**	1909**	55.1**	2320.2**	1.74**	196.19**	0.029 ^{ns}
فسفر × ماده آلی Organic × P matter	3	2420**	156.3**	1326**	225.3**	2.65**	1565.3**	0.062**	46.74**	0.037*
خطا Error	16	1.02	1.32	1.24	11.26	0.055	9.62	0.005	0.144	0.011
ضریب تغییرات Coefficient of variances		11.6	10.3	7.5	12.2	9.1	10.1	9.3	8.8	6.2

ns, * و ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح پنج و یک درصد می باشند.

ns, * and ** are non-significance and significance at five and one percent level, respectively.

نتیجه‌ای تقریباً قابل انتظار بود. حمد و همکاران (Hammad *et al.*, 2020) به بررسی تأثیر کودهای آلی و شیمیایی مختلف بر ویژگی‌های شیمیایی خاک پرداخته و گزارش کردند که میزان کربن آلی خاک پس از استفاده از ترکیبات آلی در مقایسه با شاهد افزایش یافت. بررسی تأثیر هر یکی از سطوح کود فسفره با شاهد و همچنین حضور و عدم حضور ماده آلی در این مطالعه نتوانست تأثیر آن چنانی بر میزان pH خاک داشته باشد. نکته قابل توجه اما کاهش میزان هدایت الکتریکی در برهمکنش حضور ماده آلی با دو سطح ۱۴۰ و ۲۱۰ کود فسفره بود. افزایش میزان هدایت الکتریکی در خاک پس از افزودن کود مونوپتاسیم فسفات نتیجه‌ای دور از انتظار نبود.

نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مختلف کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نشان داد که سطوح مختلف مونوپتاسیم فسفات و کود دامی تأثیر معنی داری بر میزان pH خاک نداشتند. هدایت الکتریکی خاک به شدت تحت تأثیر سطوح کود مونوپتاسیم فسفات بوده و با افزایش میزان این کود در خاک هدایت الکتریکی نیز افزایش معنی داری داشت. برعکس روند مشاهده شده در مورد هدایت الکتریکی، کربن آلی خاک همان گونه که انتظار می رفت تحت تأثیر کود دامی بوده و حضور آن در تمامی سطوح کود مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش معنی دار کربن آلی خاک شد (شکل ۱). افزایش میزان کربن آلی خاک در تیمارهای حاوی کود دامی،

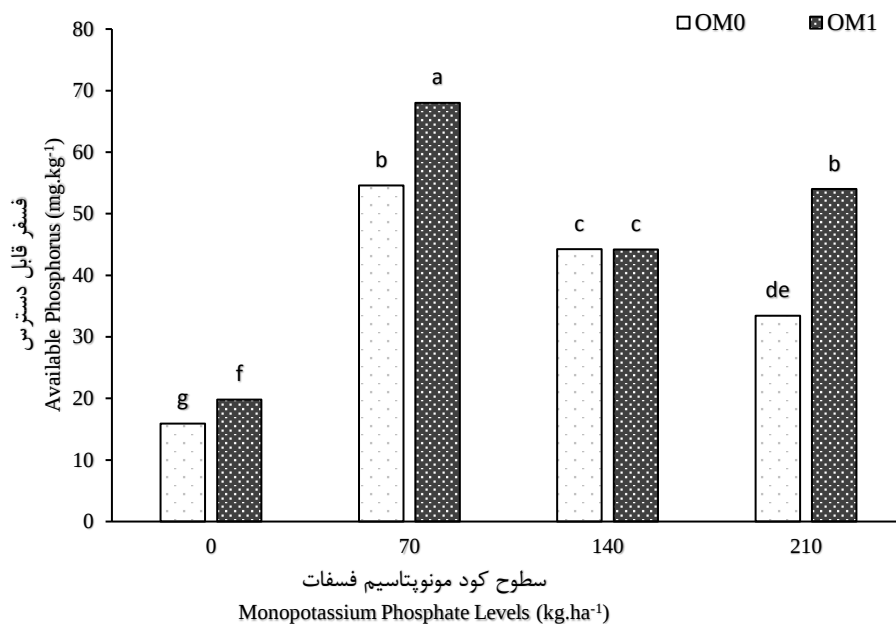


شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر pH، هدایت الکتریکی و کربن آلی خاک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 1- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on pH, electrical conductivity and soil organic carbon

میزان کربن آلی شود. البته که این مورد نیازمند بررسی بیشتر در زمینه فعالیت‌های میکروبی در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نشان داد که در شرایط کاربرد و عدم کاربرد ماده آلی، کاربرد سطوح مختلف کود فسفره سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک شد. کاربرد کود دامی در سه سطح صفر (۲۲ درصد)، ۷۰ (۳۴/۳ درصد) و ۲۱۰ (۶۳/۶ درصد) کیلوگرم در هکتار کود سبب افزایش فسفر قابل دسترس خاک شد (شکل ۲).

همچنین افزایش میزان هدایت الکتریکی خاک پس از افزودن کودهای آلی نیز در مطالعات دیگری گزارش شده که دلیل این امر آزادسازی کاتیون و آنیون‌های مختلف پس از تجزیه مواد آلی را بیان کردند (Azeez & Van Averbeke, 2012). با این حال اما نکته قابل توجه کاهش کربن آلی در حضور کود دامی در سطوح بالای فسفر بود. در مورد علت احتمالی این امر شاید بتوان به افزایش فعالیت میکروبی در سطوح بالای فسفر در خاک اشاره کرد (Chen & Xiao, 2023) که توانسته سبب افزایش تجزیه کود دامی و به تبع آن کاهش



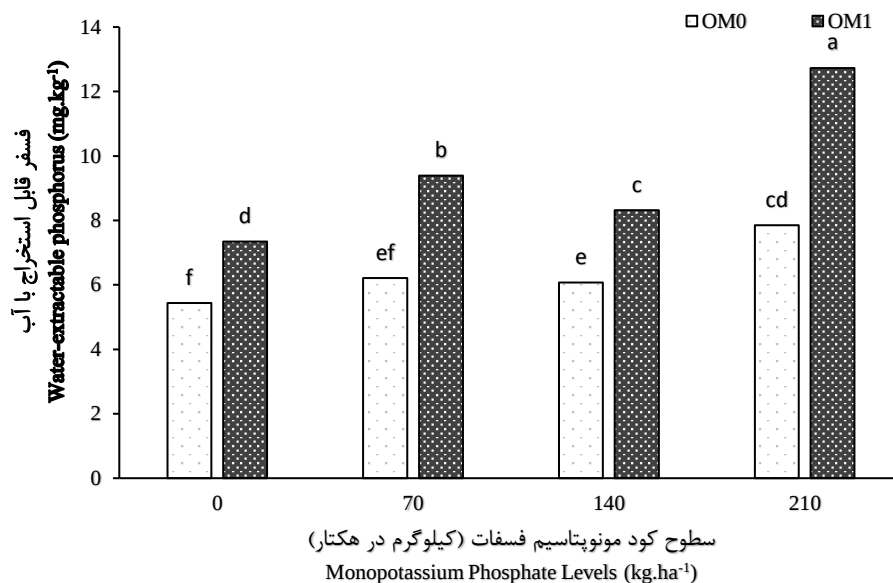
شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل جذب خاک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 2- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on available phosphorus

هکتار کود فسفره به ترتیب سبب افزایش ۱۴/۱، ۱۱/۷ و ۴۴/۵ درصدی میزان فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با سطح صفر شد. برهمکنش کود دامی و مونوپتاسیم فسفات نیز روند مثبتی داشته و میزان افزایش اندازه‌گیری شده در کاربرد کود دامی و چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ مونوپتاسیم فسفات به ترتیب ۳۵/۱، ۵۱/۲، ۳۶/۹ و ۶۲/۱ درصد در مقایسه با شاهد بدون ماده آلی بود (شکل ۳).

میزان فسفر قابل استخراج با آب در مقایسه با سایر اشکال این عنصر در خاک کمترین مقدار را داشته که علت این امر جذب این بخش توسط گیاه در طی زمان می‌باشد. در مطالعه انجام شده توسط زیگوبا و همکاران (Nziguheba, Palm, Buresh, & Smithson, 1998) بر روی تأثیر منابع مختلف شیمیایی و آلی بر اشکال مختلف فسفر در خاک گزارش شد که برهمکنش بقایای ذرت و کود سوپر فسفات تریپل سبب افزایش فسفر قابل استخراج با آب شده که در بین اشکال مختلف شیمیایی فسفر بیشترین مقدار بوده که با نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد. افزایش فسفر قابل استخراج با آب در برهمکنش کود شیمیایی و آلی احتمالاً ناشی از فسفر محلول کود دامی به خاک، معدنی شدن فسفر آلی، رقابت اسیدهای آلی با فسفر در جذب سطحی و تبدیل از شکل‌های دیگر فسفر باشد. نتایج این مطالعه با تحقیق هائو و همکاران (Hao, Godlinski, & Chang, 2008) مبنی بر افزایش فسفر محلول بعد از کاربرد کود حیوانی مطابقت دارد.

در مطالعه انجام شده توسط پوته و همکاران (Pote, Lory, & Zhang, 2003) مشخص شد که استفاده از منابع آلی و شیمیایی در خاک‌هایی با فسفر اولیه بالا سبب افزایش فسفر قابل دسترس خاک شدند. در مطالعه دیگری نیز مشخص شد که استفاده منابع آلی مختلف و کودهای شیمیایی فسفر سبب افزایش فسفر اولسن شد که با نتایج این مطالعه نیز همخوانی داشت (Battisti, Moretti, Sacco, Grignani, & Zavattaro, 2022). در مورد علل احتمالی افزایش فسفر قابل دسترس در زمان افزودن ترکیبات آلی، گزارش شده که احتمالاً کاهش رسوب فسفات کلسیم و نرخ رسوب فسفات کم محلول و افزایش فسفر اولیه خاک از جمله این عوامل می‌باشند (Mao et al., 2015). با افزایش میزان ورودی کود مونوپتاسیم فسفات در خاک، فسفر قابل دسترس برخلاف انتظار کاهش یافت. در مورد علت احتمالی این امر می‌توان به رسوب فسفر در خاک اشاره کرد. در این مورد مطالعات نشان داده که فسفر وارد شده به خاک از طریق کودهای شیمیایی به‌راحتی توسط یون‌های آهن و آلومینیوم در خاک‌های اسیدی یا توسط یون‌های کلسیم و منیزیم در خاک‌های قلیایی جذب شده و رسوب می‌دهد (Naeem, Masood, Turan, & Iqbal, 2021; Penn & Camberato, 2019). کاربرد کود دامی و همچنین افزایش سطوح کود مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش غلظت فسفر قابل استخراج با آب در این مطالعه شد. نتایج همچنین نشان داد که در کاربرد و عدم کاربرد کود دامی، افزایش سطوح مونوپتاسیم فسفات سبب افزایش غلظت فسفر قابل استخراج با آب شد. سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در



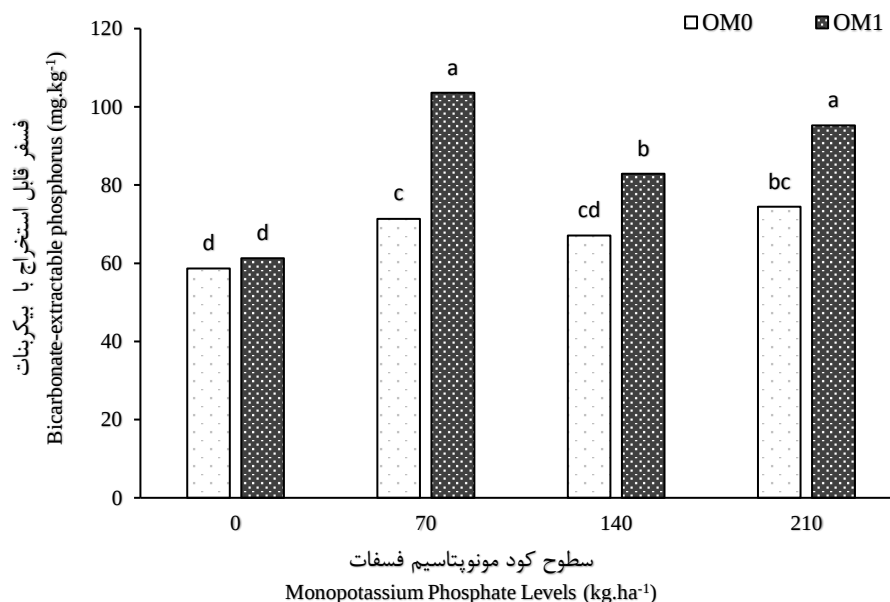
شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با آب

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 3- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with water

کود به‌ترتیب ۲۲/۴، ۱۵/۵ و ۲۷/۵ درصد بود (شکل ۴). هر یک از سطوح کود مونوپتاسیم فسفات، کاربرد کود دامی نیز تأثیر مثبتی داشته به‌طوری‌که در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ در مقایسه با تیمار بدون ماده آلی به‌ترتیب افزایش ۵/۱، ۴۵، ۲۲/۳ و ۲۸/۳ درصدی در میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات مشاهده شد.

تأثیر افزایش میزان کود مونوپتاسیم فسفات در خاک و همچنین حضور کود دامی به‌عنوان یک منبع آلی بر میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات مثبت بوده و غلظت این بخش از فسفر در کاربرد و عدم کاربرد کود دامی افزایش یافت. نتایج مقایسه میانگین برهمکنش این دو نشان داد که در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش این پارامتر در مقایسه با شاهد بدون



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 4- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with bicarbonate

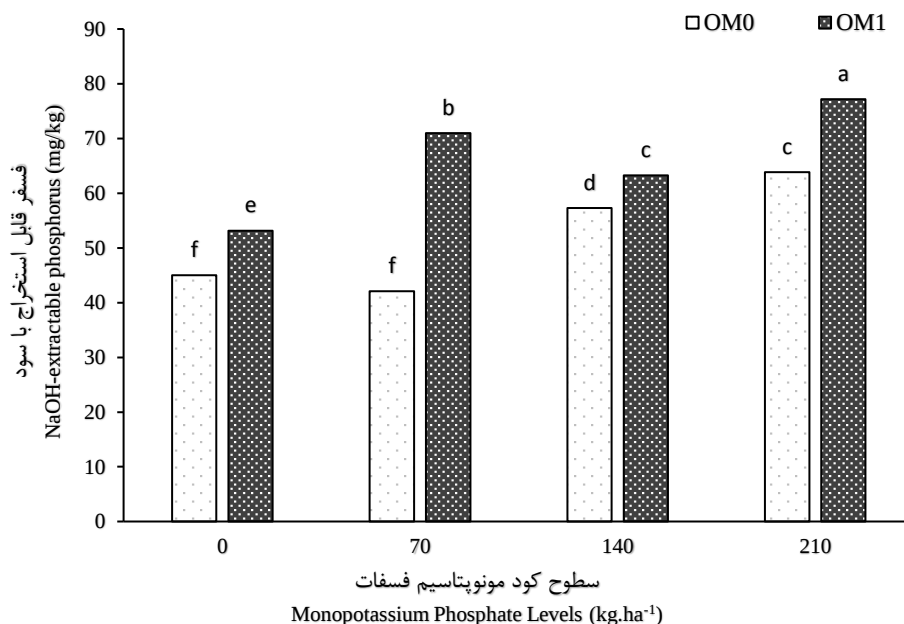
در هکتار مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش اندازه‌گیری شده در حضور کود دامی در مقایسه با شاهد (بدون کود) به ترتیب ۱۷/۷، ۶۹، ۱۰/۵ و ۲۲/۲ درصد بود (شکل ۵).

بخش فسفر قابل استخراج با سود توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم جذب شده است (Zhang, Li, & Li, 2019). افزایش در میزان فسفر قابل استخراج با سود طبق گزارش‌های سایر محققین احتمالاً به دلیل آزاد شدن فسفر محلول بخش آلی اضافه شده به خاک می‌باشد (Negassa & Leinweber, 2009). اختر و همکاران (Akhtar, McCallister, & Eskridge, 2002) علت افزایش فسفر قابل استخراج با سود را تغییرات شرایط رداکس خاک پس از افزودن ماده آلی بیان کردند که سبب حالیت اکسیدهای آهن و آلومینیوم می‌شود.

افزایش سطوح کود مونوپتاسیم فسفات در خاک تأثیر منفی بر میزان فسفر قابل حل در اسید را داشته و سبب کاهش آن در مقایسه با تیمار بدون کود شد. این میزان کاهش که اختلاف معنی‌داری نیز با شاهد داشته در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب درصد بود (شکل ۶). تأثیر کاربرد کود دامی نیز متفاوت بوده به‌طوری‌که در سه سطح صفر، ۱۴۰ و ۲۱۰ کود حضور ماده آلی به ترتیب سبب افزایش ۳/۱، ۷/۹ و ۳/۹ درصدی فسفر قابل استخراج با اسید شده و در سطح ۱۴۰ سبب کاهش ۲ درصدی آن شد.

این بخش از فسفر خاک به‌طور کلی نشان‌دهنده میزانی از فسفر بوده که به‌صورت غیراختصاصی جذب سطوح اجزای خاک می‌شود و همراه با فسفر قابل استخراج با آب، قابل دسترس‌ترین قسمت فسفر خاک می‌باشند (Reddy, Rao, & Singh, 2005). افزایش میزان فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم در زمان استفاده از کودهای آلی توسط محققین دیگری نیز گزارش شده که با نتایج به دست آمده در این مطالعه نیز همخوانی داشت (Uygun & Karabatak, 2009; Waldrip, He, & Erich, 2011). این محققین دلایلی همچون آزاد شدن فسفر این ترکیبات و همچنین اثر آن‌ها بر کاهش میزان pH خاک را به‌عنوان عوامل اصلی در این افزایش بیان کردند. در گزارش دیگری نیز بیان شده که انتشار اسیدهای آلی در خاک اطراف و همچنین سایر متابولیت‌های ثانویه میکروبی، به دلیل استفاده از کود دامی نیز بر بخش‌های فسفر خاک و فراهمی آن تأثیر مثبت می‌گذارد (Malik, Marschner, & Khan, 2012).

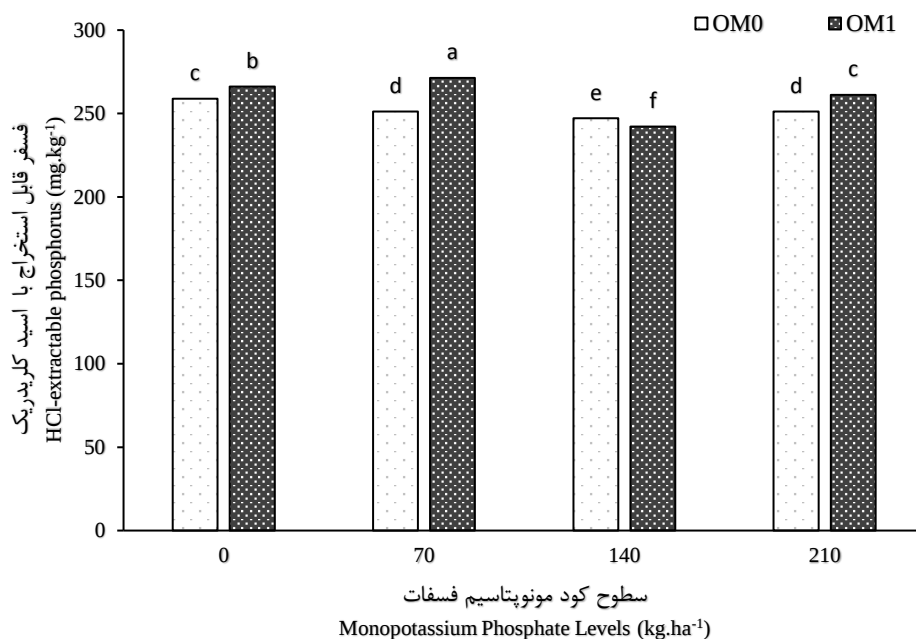
میزان فسفر قابل استخراج با سود با افزایش مقدار کود مونوپتاسیم فسفات در خاک افزایش داشته که این میزان در دو سطح ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب ۲۶/۶ و ۴۰ درصد در مقایسه با شاهد بدون کود بود. کاربرد کود دامی نیز تأثیر مثبتی بر غلظت فسفر قابل استخراج با سود داشته و سبب افزایش غلظت آن در تمامی سطوح کود مونوپتاسیم فسفات شد. در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با سود

(ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 5- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with NaOH



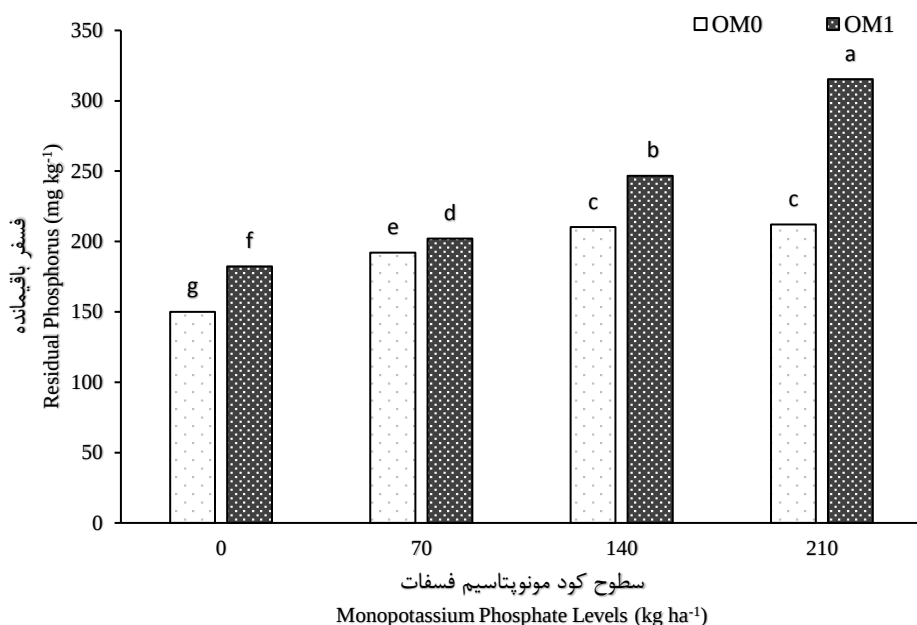
شکل ۶- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر قابل استخراج با اسید کلریدریک (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 6- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on phosphorus extractable with hydrochloric acid

سطوح کود مونوپتاسیم فسفات شد. در چهار سطح صفر، ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار مونوپتاسیم فسفات، میزان افزایش اندازه‌گیری شده در حضور کود دامی در مقایسه با شاهد (بدون کود) به ترتیب ۲۱/۳، ۵/۲، ۱۷/۱ و ۴۸/۵ درصد بود. (شکل ۷). لازم به ذکر است که میزان فسفر باقیمانده با افزایش مقدار کود در خاک نیز افزایش معنی‌داری در مقایسه با شاهد داشته که این میزان در سه سطح ۷۰، ۱۴۰ و ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کود به ترتیب ۲۸، ۴۰ و ۴۱/۳ درصد در مقایسه با شاهد بدون کود بود.

فسفر باقیمانده تنها بخشی از این عنصر بوده که به صورت مستقیم تحت تأثیر افزودن مقادیر مختلف کود مونوپتاسیم فسفات به خاک شد. حضور ماده آلی نیز در سطح ۲۱۰ کیلوگرم در هکتار کودی در مقایسه با سایر سطوح قابل ملاحظه بود. تأثیر مثبت افزایش سطح کود مونوپتاسیم فسفات و همچنین کود دامی بر فسفر باقیمانده مشاهده شد. صمدی و گیلکز (Samadi & Gilkes, 1999) افزایش غلظت فسفر کل در یک خاک آهکی را پس از اضافه کردن منبع شیمیایی آن گزارش کردند. این افزایش در مقدار فسفر کل و باقیمانده پس از تیمار کردن خاک با منابع فسفره در مطالعه پاویناتو و همکاران (Pavinato, Merlin, & Rosolem, 2009) نیز مشاهده شده که با نتایج به دست آمده در این مطالعه همخوانی داشت. افزایش میزان فسفر کل در مطالعه انجام شده توسط مائو و همکاران (Mao et al., 2023) در پی افزودن ماده آلی نیز گزارش شد.

فسفر قابل استخراج با اسید بخشی از فسفر معدنی است که توسط کانی‌های کربناته کلسیم جذب و توسط آن‌ها تثبیت شده است و لذا تغییر در حلالیت کربنات کلسیم می‌تواند مقدار این بخش از فسفر را تحت تأثیر قرار دهد (Waldrip et al., 2011). این بخش از فسفر همچنین عنوان نشان دهنده گردش پایدار یا آهسته فسفر در نظر گرفته می‌شود و به طور کلی فقط حاوی مقادیر کمی فسفر آلی است (Negassa & Leinweber, 2009). بررسی تأثیر مواد آلی بر غلظت فسفر نتایج متفاوتی را نشان داده که این نتایج به زمان استفاده از این ترکیبات نیز بستگی دارد. به عنوان مثال ساتو و همکاران (Sato, Solomon, Hyland, Ketterings, & Lehmann, 2005) گزارش کردند که در زمان کوتاه استفاده از ترکیبات آلی باعث تشکیل فسفات کلسیم آمورف شده که حلالیت زیادی داشته؛ ولی به مرور زمان اشکال پایدارتر فسفر تشکیل شده که این موضوع سبب کاهش قابلیت جذب فسفر شود. تغییر در pH خاک تأثیر مستقیمی بر این شکل از فسفر داشته و در این مطالعه تیمارهای مورد مطالعه نتوانستند تأثیر به سزایی بر میزان pH خاک داشته باشند و احتمالاً دلیل تأثیرگذاری کم در این بخش نیز همین مورد می‌باشد. کاهش میزان فسفر قابل استخراج با اسید در سطوح بالای کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی نیز احتمالاً به دلیل کاهش میزان کربن آلی خاک در این تیمارها بوده که در بخش کربن آلی به آن اشاره شد. حضور کود دامی سبب افزایش غلظت فسفر کل باقیمانده در تمامی



شکل ۷- نتایج مقایسه میانگین برهمکنش سطوح مونوپتاسیم فسفات و کود دامی بر میزان فسفر باقیمانده (ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی‌دار نمی‌باشد)

Figure 7- Mean comparison of interaction of phosphorus and organic matter levels on residual phosphorus

جدول ۴- نتایج همبستگی بین کربن آلی و pH خاک با اشکال مختلف فسفر

Table 4- Correlation results between organic carbon and soil pH with different forms of phosphorus

	Residual-P	HCl-P	NaOH-P	NaHCO ₃ -P	H ₂ O-P	Olsen-P
کربن آلی Organic matter	0.04 ^{ns}	0.60 ^{**}	0.44 [*]	0.44 [*]	0.57 ^{**}	0.36 ^{ns}
پ هاش خاک Soil pH	0.12 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.53 ^{**}	0.38 ^{ns}	0.47 [*]

ns, * و ** به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد می‌باشند.

ns, * and ** indicate non-significant, significant at the 5% level, and significant at the 1% level, respectively

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی کود مونوپتاسیم فسفات و کود دامی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و افزایش فراهمی فسفر داشت. کود مونوپتاسیم فسفات موجب افزایش هدایت الکتریکی و کود دامی باعث ارتقاء محتوای کربن آلی خاک شد. با این حال، برهم‌کنش این دو در سطوح بالای فسفر منجر به کاهش نسبی کربن آلی گردید که احتمالاً ناشی از تحریک فعالیت میکروبی و تسریع تجزیه ماده آلی بود. افزایش غلظت فسفر در اشکال قابل جذب مانند فسفر قابل استخراج با آب و بی‌کربنات در حضور کود دامی به‌وضوح مشاهده شد که بیانگر نقش مهم ماده آلی در افزایش قابلیت دسترسی فسفر است. به‌طور خاص، حضور کود دامی توانست در برخی سطوح فسفر، غلظت فسفر محلول را تا بیش از ۶۰ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. در مقابل، اشکال کم‌تحرک‌تر فسفر نظیر فسفر

در مورد علت این امر بیان شده که افزودن ماده آلی فعالیت میکروبی را افزایش داده و چرخه عناصر غذایی را که توسط میکروب‌های خاک کنترل می‌شود را تحریک کرده (Lin et al., 2019) و فعالیت فسفومونواستراز خاک (PME) را افزایش می‌دهد که فعالیت این آنزیم باعث افزایش میزان معدنی شدن فسفر آلی می‌شود (Nakayama, Wade, & Margenot, 2021).

نتایج بررسی همبستگی پیرسون بین کربن آلی و pH خاک با اشکال مختلف فسفر در جدول ۴ نشان داد که بیشترین همبستگی کربن آلی با دو فرم قابل استخراج با آب و اسید کلریدریک به‌ترتیب با مقادیر ۰/۵۷ و ۰/۶۰ بود. همبستگی بین فسفر اولسن و قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم با pH خاک معنی‌دار بوده و سایر اشکال این عنصر همبستگی معنی‌داری نداشتند. مشابه با نتایج به دست آمده در این مطالعه، پژوهشگران نیز گزارش کرد که بین اشکال مختلف فسفر با کربن آلی و pH خاک مثبت و معنی‌دار بود.

در مدیریت تغذیه فسفری گیاهان و بهبود پایداری سیستم‌های زراعی، به‌ویژه در خاک‌های کم‌بازده، بسیار مؤثر واقع شود. توصیه می‌شود در برنامه‌های حاصلخیزی خاک، استفاده تلفیقی از کودهای آلی و شیمیایی به‌عنوان راهبردی علمی و زیست‌سازگار مدنظر قرار گیرد.

قابل استخراج با اسید در سطوح بالای کود شیمیایی کاهش یافتند که می‌تواند ناشی از پدیده‌های تثبیت و رسوب فسفر در خاک باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از منابع آلی و معدنی، نه تنها بهره‌وری جذب فسفر را افزایش می‌دهد، بلکه از اتلاف آن در قالب اشکال تثبیت‌شده و کم‌دسترس جلوگیری می‌کند. این رویکرد می‌تواند

References

1. Abolfazli, F., Forghani, A., & Norouzi, M. (2012). Effects of phosphorus and organic fertilizers on phosphorus fractions in submerged soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2), 349–362. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000200014>
2. Akhtar, M., McCallister, D.L., & Eskridge, K.M. (2002). Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(13–14), 2057–2068. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005748>
3. Azeez, J.O., & Van Averbek, W. (2012). Dynamics of soil pH and electrical conductivity with the application of three animal manures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43(6), 865–874. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.653022>
4. Battisti, M., Moretti, B., Sacco, D., Grignani, C., & Zavattaro, L. (2022). Soil Olsen P response to different phosphorus fertilization strategies in long-term experiments in NW Italy. *Soil Use and Management*, 38(1), 549–563. <https://doi.org/10.1111/sum.12701>
5. Chen, C., & Xiao, W. (2023). The global positive effect of phosphorus addition on soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 176, 108882. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108882>
6. Chen, G.-L., Xiao, L., Xia, Q.-L., Wang, Y., Yuan, J.-H., Chen, H., Wang, S.-Q., & Zhu, Y.-Y. (2021). Characterization of different phosphorus forms in flooded and upland paddy soils incubated with various manures. *ACS Omega*, 6(4), 3259–3266. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05748>
7. Chiu, K.K., Ye, Z.H., & Wong, M.H. (2006). Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: a greenhouse study. *Bioresource Technology*, 97(1), 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.038>
8. Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
9. Fan, X., Zhou, X., Chen, H., Tang, M., & Xie, X. (2021). Cross-talks between macro- and micronutrient uptake and signaling in plants. *Frontiers in Plant Science*, 12, 663477. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.663477>
10. Gangwar, K.S., Singh, K.K., Sharma, S.K., & Tomar, O.K. (2006). Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic plains. *Soil and Tillage Research*, 88(1–2), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.015>
11. Gatiboni, L.C., Schmitt, D.E., Cassol, P.C., Comin, J.J., Heidemann, J.C., Brunetto, G., & Nicoloso, R. da S. (2019). Samples disturbance overestimates phosphorus adsorption capacity in soils under long-term application of pig slurry. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1262–1272. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1562274>
12. González Medeiros, J.J., Pérez Cid, B., & Fernández Gómez, E. (2005). Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381, 873–878. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2989-z>
13. Hammad, H.M., Khaliq, A., Abbas, F., Farhad, W., Fahad, S., Aslam, M., Shah, G.M., Nasim, W., Mubeen, M., & Bakhat, H.F. (2020). Comparative effects of organic and inorganic fertilizers on soil organic carbon and wheat productivity under arid region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(10), 1406–1422. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1763385>
14. Hao, X., Godlinski, F., & Chang, C. (2008). Distribution of phosphorus forms in soil following long-term continuous and discontinuous cattle manure applications. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 90–97. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0344>
15. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., & Chauhan, B. (1982). Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
16. Helfenstein, J., Tamburini, F., von Sperber, C., Massey, M.S., Pistocchi, C., Chadwick, O.A., Vitousek, P.M., Kretschmar, R., & Frossard, E. (2018). Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil. *Nature Communications*, 9(1), 3226. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05731-2>
17. Jalali, M., & Ranjbar, F. (2010). Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*, 155(1–2), 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>
18. Jiang, B., Jianlin, S., Minghong, S.U.N., Yajun, H.U., Jiang, W., Juan, W., Yong, L.I., & Jinshui, W.U. (2021). Soil

- phosphorus availability and rice phosphorus uptake in paddy fields under various agronomic practices. *Pedosphere*, 31(1), 103–115. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60053-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60053-4)
19. Jindo, K., Audette, Y., Olivares, F.L., Canellas, L.P., Smith, D.S., & Paul Voroney, R. (2023). Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: A review. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00401-y>
20. Lemming, C., Simmelsgaard Nielsen, M. T., Jensen, L. S., Scheutz, C., & Magid, J. (2020). Phosphorus availability of sewage sludges and ashes in soils of contrasting pH. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(6), 682–694. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900323>
21. Li, M., Zhao, Z., Zhang, Z., Zhang, W., Zhou, J., Xu, F., & Liu, X. (2017). Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Scientific Reports*, 7(1), 4420. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04655-z>
22. Lin, Y., Ye, G., Kuzyakov, Y., Liu, D., Fan, J., & Ding, W. (2019). Long-term manure application increases soil organic matter and aggregation, and alters microbial community structure and keystone taxa. *Soil Biology and Biochemistry*, 134, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.030>
23. Mahmood, F., Khan, I., Ashraf, U., Shahzad, T., Hussain, S., Shahid, M., Abid, M., & Ullah, S. (2017). Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 22–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000002>
24. Malik, M.A., Marschner, P., & Khan, K.S. (2012). Addition of organic and inorganic P sources to soil—Effects on P pools and microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.02.013>
25. Mao, X., Xu, X., Lu, K., Gielen, G., Luo, J., He, L., Donnison, A., Xu, Z., Xu, J., & Yang, W. (2015). Effect of 17 years of organic and inorganic fertilizer applications on soil phosphorus dynamics in a rice–wheat rotation cropping system in eastern China. *Journal of Soils and Sediments*, 15, 1889–1899. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1137-z>
26. Mao, Y., Hu, W., Li, Y., Li, Y., Lei, B., & Zheng, Y. (2023). Long-term cattle manure addition enhances soil-available phosphorus fractions in subtropical open-field rotated vegetable systems. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1138207. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138207>
27. Martins, M.A., Santos, C., Almeida, M.M., & Costa, M.E.V. (2008). Hydroxyapatite micro-and nanoparticles: nucleation and growth mechanisms in the presence of citrate species. *Journal of Colloid and Interface Science*, 318(2), 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.10.008>
28. Meng, D., Xu, P., Dong, Q., Wang, S., & Wang, Z. (2017). Comparison of foliar and root application of potassium dihydrogen phosphate in regulating cadmium translocation and accumulation in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3304-x>
29. Metson, G.S., MacDonald, G.K., Haberman, D., Nesme, T., & Bennett, E.M. (2016). Feeding the corn belt: opportunities for phosphorus recycling in US agriculture. *Science of the Total Environment*, 542, 1117–1126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.047>
30. Montalvo, D., Degryse, F., Da Silva, R.C., Baird, R., & McLaughlin, M.J. (2016). Agronomic effectiveness of zinc sources as micronutrient fertilizer. *Advances in Agronomy*, 139, 215–267. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.05.004>
31. Murphy, J., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
32. Naeem, I., Masood, N., Turan, V., & Iqbal, M. (2021). Prospective usage of magnesium potassium phosphate cement combined with *Bougainvillea alba* derived biochar to reduce Pb bioavailability in soil and its uptake by *Spinacia oleracea* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111723. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111723>
33. Nakayama, Y., Wade, J., & Margenot, A.J. (2021). Does soil phosphomonoesterase activity reflect phosphorus pools estimated by Hedley phosphorus fractionation? *Geoderma*, 401, 115279. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115279>
34. Negassa, W., & Leinweber, P. (2009). How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 305–325. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800223>
35. Nziguheba, G., Palm, C.A., Buresh, R.J., & Smithson, P.C. (1998). Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil*, 198, 159–168. <https://doi.org/10.1023/A:1004389704235>
36. Olsen, S.R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (Issue 939). US Department of Agriculture.
37. Pavinato, P.S., Merlin, A., & Rosolem, C.A. (2009). Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.07.001>
38. Penn, C.J., & Camberato, J.J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
39. Pote, D.H., Lory, J.A., & Zhang, H. (2003). Does initial soil P level affect water-extractable soil P response to

- applied P? *Advances in Environmental Research*, 7(2), 503–509. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00020-5)
40. Qiu, S.-L., Wang, L.-M., Huang, D.-F., & Lin, X.-J. (2014). Effects of fertilization regimes on tea yields, soil fertility, and soil microbial diversity. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(3), 333–339.
41. Reddy, D.D., Rao, S.A., & Singh, M. (2005). Changes in P fractions and sorption in an Alfisol following crop residues application. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(2), 241–247. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421444>
42. Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 417–435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
43. Samadi, A., & Gilkes, R.J. (1999). Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 809–815. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.634809x>
44. Sato, S., Solomon, D., Hyland, C., Ketterings, Q.M., & Lehmann, J. (2005). Phosphorus speciation in manure and manure-amended soils using XANES spectroscopy. *Environmental Science & Technology*, 39(19), 7485–7491. <https://doi.org/10.1021/es0503130>
45. Singh, J.S., Pandey, V.C., & Singh, D.P. (2011). Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(3–4), 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
46. Sun, R., Zhang, X.-X., Guo, X., Wang, D., & Chu, H. (2015). Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.007>
47. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 475–490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
48. Tian, F., Gong, J., Zhang, J., Zhang, M., Wang, G., Li, A., & Wang, W. (2013). Enhanced stability of thylakoid membrane proteins and antioxidant competence contribute to drought stress resistance in the *tasg1* wheat stay-green mutant. *Journal of Experimental Botany*, 64(6), 1509–1520. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert004>
49. Uygur, V., & Karabatak, I. (2009). The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 336–345. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700326>
50. Wahid, F., Fahad, S., Danish, S., Adnan, M., Yue, Z., Saud, S., Siddiqui, M. H., Brtnicky, M., Hammerschmidt, T., & Datta, R. (2020). Sustainable management with mycorrhizae and phosphate solubilizing bacteria for enhanced phosphorus uptake in calcareous soils. *Agriculture*, 10(8), 334. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080334>
51. Wakley, A., & Black, C.A. (1934). Determination of organic matter in the soil by chromic acid digestion. *Soil Science*, 63, 251–264.
52. Waldrup, H.M., He, Z., & Erich, M.S. (2011). Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biology and Fertility of Soils*, 47, 407–418. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0546-4>
53. Wang, J., Song, Y., Ma, T., Raza, W., Li, J., Howland, J.G., Huang, Q., & Shen, Q. (2017). Impacts of inorganic and organic fertilization treatments on bacterial and fungal communities in a paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 112, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.005>
54. Xiong, W., Jousset, A., Guo, S., Karlsson, I., Zhao, Q., Wu, H., Kowalchuk, G. A., Shen, Q., Li, R., & Geisen, S. (2018). Soil protist communities form a dynamic hub in the soil microbiome. *The ISME Journal*, 12(2), 634–638. <https://doi.org/10.1038/ismej.2017.171>
55. Yu, W., Li, G., Hartmann, T.E., Xu, M., Yang, X., Li, H., Zhang, J., & Shen, J. (2021). Development of a novel model of soil legacy P assessment for calcareous and acidic soils. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 621833. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.621833>
56. Zhang, W., Li, H., & Li, Y. (2019). Spatio-temporal dynamics of nitrogen and phosphorus input budgets in a global hotspot of anthropogenic inputs. *Science of the Total Environment*, 656, 1108–1120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.450>
57. Zhao, D., & Tao, J. (2015). Recent advances on the development and regulation of flower color in ornamental plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 125534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00261>

Spatiotemporal Mapping of Soil Organic Carbon Using an Inverse Modeling Approach: A Case Study of the Zayandeh Rud Watershed in Isfahan Province

S. Masoumi¹, H.R. Matinfar^{1*}, S.R. Mousavi²

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran

(* - Corresponding Author Email: matinfar.h@lu.ac.ir)

2- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: 21 June 2025

Revised: 21 July 2025

Accepted: 07 September 2025

Available Online: 07 September 2025

How to cite this article:

Masoumi, S., Matinfar, H.R., & Mousavi, S.R. (2025). Spatiotemporal mapping of soil organic carbon using an inverse modeling approach: A case study of the Zayandeh Rud watershed in Isfahan province. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 291-312. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94129.1488>

Introduction

Soil organic carbon (SOC), as one of the most important components of the global carbon cycle, plays a vital role in maintaining soil quality, enhancing fertility, and moderating climate change. The spatio-temporal variations of SOC are influenced by various factors, including land use, climatic conditions, topography, and human activities. Additionally, SOC contributes to diverse functions in natural and agricultural ecosystems, such as increasing soil fertility, controlling erosion, enhancing water permeability in soil, and reducing the effects of greenhouse gases.

Materials and Methods

Given the critical role of SOC in enhancing soil quality, this study aims to investigate the spatio-temporal variability of SOC using a reverse modeling approach based on a spatial model developed in 2024. The model is extended to analyze data from the years prior to 2015, 2010, and 2000, incorporating environmental variables derived from remote sensing (RS), topographic attributes, climatic data, land use, and geological information within the Zayandeh Rud watershed. For the environmental covariates, RS data, land use, and climatic information were obtained from Google Earth Engine's open-source spatial database for the relevant years from 2000 to 2024. In total, 76 auxiliary variables were prepared, including vegetation indices derived from band ratios of RS data, as well as the digital elevation model (DEM), geology, land use, and climatic factors, which were used as representatives of soil-forming factors. A relative importance feature selection method was employed to finalize the dataset of environmental covariates. Furthermore, three machine learning models, Random Forest (RF), Support Vector Regression (SVR), and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) tree, were utilized to explore the relationships between environmental factors and SOC. Four common statistical indices, including the coefficient of determination (R^2), concordance correlation coefficient (CCC), root mean square error (RMSE), and percentage of normalized root mean square error (nRMSE), were used to evaluate the performance of the machine learning models. Two uncertainty quantification approaches for prediction, namely bootstrap and k-fold cross-validation, were also applied.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.94129.1488>

Results and Discussion

The evaluation of machine learning models for predicting SOC revealed a notable decline in the performance of all models from the year 2024 back to 2000, as indicated by the R^2 statistic. Among the models assessed, the RF model exhibited superior performance, achieving the highest R^2 values for the years 2024 and 2015, thereby indicating its effectiveness in capturing the complexities of SOC dynamics. The SVR model demonstrated intermediate performance, while the XGBoost model showed relatively weaker results compared to the other two models. Despite these variances in performance, all three machine learning models effectively established a robust connection between SOC and the predictive environmental variables, affirming their suitability for this analysis. Furthermore, the uncertainty quantification of SOC predictions highlighted that the bootstrap method outperformed the k-fold method, yielding lower values for both standard deviation (SD) and mean uncertainty, which suggests that the bootstrap approach provides a more reliable prediction of SOC variability. In terms of the relative importance of environmental variables in predicting SOC, the analysis across all time periods indicated that climatic factors played the most significant role, closely followed by topographical attributes. Other environmental variables, including land use, geology, and RS data, had a lesser impact on explaining spatial variations in SOC. The spatial analysis indicated alarming increases in areas with very low SOC content, suggesting soil degradation risks. Furthermore, higher rainfall and lower temperatures were associated with the highest SOC levels, emphasizing the need for effective soil management strategies.

Conclusion

This study emphasizes the necessity of ongoing monitoring and management of soil organic carbon (SOC) to combat soil degradation and promote sustainable agriculture. The findings also provide a framework for creating soil property maps in data-scarce regions, enhancing decision-making for effective soil management strategies. Overall, the findings from this study highlight the need for continuous monitoring and management of SOC to mitigate risks related to soil degradation and to promote sustainable agricultural practices.

Keywords: Digital mapping, Environmental variables, Machine learning algorithms, Temporal and spatial variability

مقاله پژوهشی

جلد ۳۹، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۴، ص. ۲۹۱-۳۱۲

نقشه‌برداری زمانی مکانی کربن آلی خاک با استفاده از رویکرد مدلسازی معکوس: مطالعه موردی حوضه آبخیز زاینده‌رود استان اصفهان

شیما معصومی^۱ - حمیدرضا متین فر^{۱*} - سید روح اله موسوی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

چکیده

تغییرات زمانی و مکانی کربن آلی خاک تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله کاربری اراضی، شرایط اقلیمی، پستی و بلندی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. با توجه به جایگاه کربن آلی در بهبود کیفیت خاک، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی و مکانی کربن آلی خاک (SOC) با استفاده از رویکرد مدلسازی معکوس بر مبنای مدل مکانی تهیه شده در سال ۲۰۲۴ و تعمیم آن به سال‌های ماقبل ۲۰۱۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰ با استفاده از متغیرهای محیطی در حوضه آبخیز زاینده‌رود انجام گردید. همچنین سه مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و درخت تقویت شده با گرادیان افراطی (XGBoost) برای بررسی ارتباط بین متغیرهای محیطی و SOC به همراه دو رویکرد کمی‌سازی عدم قطعیت پیش‌بینی شامل بوتسراپ و k-فولد استفاده گردید. نتایج اعتبارسنجی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین حاکی از دقت بالاتر مدل RF نسبت به دو مدل دیگر بود. اگرچه به‌طور مشابه در هر سه مدل روند دقت پیش‌بینی SOC از سال ۲۰۲۴ به ۲۰۰۰ کاهش یافت. همچنین رویکرد عدم قطعیت بوتسراپ بر اساس آماره‌های انحراف معیار و میانگین عدم قطعیت از اطمینان بالاتری در پیش‌بینی SOC برخوردار بود. اهمیت نسبی متغیرهای محیطی نیز نشان‌دهنده این بود که عوامل اقلیمی و پستی و بلندی از درجه اهمیت بالاتری در پیش‌بینی SOC بودند. همچنین، تغییرات مکانی SOC با روند الگوی پراکنش متغیرهای اقلیمی و پستی و بلندی همخوانی داشت، به‌طوری‌که مناطق با بارش و ارتفاع بیشتر به‌همراه دمای پایین‌تر، محتوای SOC بیشتری را نشان دادند. نقشه‌های پیش‌بینی مکانی و زمانی نیز بیانگر افزایش سطح اراضی با محتوای SOC بسیار پایین (کمتر از ۰/۵٪) در طی دوره زمانی بلند مورد بررسی از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ بود. به‌طور کلی رویکرد مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب مناسب برای دست‌یابی به روند تغییرات ویژگی‌های خاک در مناطقی باشد، که به‌طور عمده فاقد پایگاه داده‌های اطلاعات مکانی خاک در گذشته می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تغییرپذیری زمانی و مکانی، متغیرهای محیطی، نقشه‌برداری رقومی

مقدمه

اراضی، شرایط اقلیمی، پستی و بلندی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد (Parras-Alcántara, Díaz-Jaimes, & Lozano-García, 2015). همچنین SOC در زیست‌بوم‌های طبیعی و زراعی از کارکردهای متنوعی همچون افزایش حاصلخیزی خاک، کنترل فرسایش، افزایش نفوذپذیری آب در خاک و کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای برخوردار

کربن آلی خاک (SOC) به‌عنوان یکی از مهمترین اجزای چرخه جهانی کربن، نقش حیاتی در حفظ کیفیت خاک، افزایش حاصلخیزی و تعدیل تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (Yang et al., 2020). تغییرات زمانی و مکانی SOC تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله کاربری

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: matinfar.h@lu.ac.ir)

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

است (Laban, Metternicht, & Davies, 2018). از این رو SOC یک ویژگی کلیدی در تعیین سلامت و کیفیت خاک محسوب می‌شود که تمامی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (Mousavi, Sarmadian, Angelini, Bogaert, & Omid, 2023; Matinfar, Maghsodi, Mousavi, & Rahmani, 2021).

نقشه‌های خاک یکی از ابزارهای بسیار مؤثر در مباحث تصمیم‌گیری‌های توسعه کشاورزی (تناسب اراضی، الگوی کشت)، حفاظت خاک و بهبود بخشیدن به روند تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌ریزی‌های مدیریت سرزمین می‌باشد (Adedeji, 2019)، اما باید توجه داشت که به‌روز رسانی نقشه‌ها و اطلاعات خاک با روش‌های معمول^۱ برای کشور وسیعی مانند ایران فرآیندی زمانبر و هزینه‌بردار است. از این رو تهیه نقشه با روش‌های جدید و با قابلیت تعمیم در مقیاس‌های وسیع منطقه-ای و ملی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Zeraatpisheh et al., 2020). امروزه استفاده از روش‌های پدومتری جهت برآورد توزیع مکانی داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی خاک، به دلیل در نظر گرفتن پیوستگی مکانی داده‌ها، نسبت به روش‌های معمول و زمین‌آمار^۲ روبه افزایش است و نقشه‌برداری رقومی خاک^۳ (DSM) به منزله‌ی زیر مجموعه‌ای از علم پدومتری، به دلیل افزایش منابع داده‌های کمکی یا محیطی با دسترسی آسان، به‌طور کاملاً عملی توانسته است به انتقادات وارده بر رویکرد خاک‌شناسی مرسوم فایق آید (Vasiliniuc, Patriche, & Mousavi et al., 2023; Pîrnău, & Roșca, 2013). این درحالی است که در رویکرد مرسوم بدلیل وابستگی به دانش کارشناس، عدم ارائه نتایج کمی از نتایج نقشه‌برداری، ناتوانی در ارائه تغییرات پیوسته پراکنش مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک عملاً یک روش پرهزینه و وقت‌گیر بوده و در نتیجه برای اهداف کاربردی دارای محدودیت است (Kulikova, Chechenkov, Osipova, Shopina, & Semenov, 2023; Taghizadeh-Mehrjardi, Neupane, Sood, & Kumar, 2017).

در مورد پراکنش مکانی SOC مطالعات متعددی توسط محققین پیشین در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران و جهان از قبیل مطالعه‌ای که در مناطق مرتعی استان ایلام با هدف بررسی میزان ذخیره کربن آلی خاک^۴ سطحی با استفاده از دو مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) و کوپست (CB) انجام گردید و محققین گزارش نمودند که ترکیبی از داده‌های سنجش از دور و پستی و بلندی کارایی خوبی در فرآیند پیش‌بینی داشتند (Rostaminia, Rahmani, Mousavi, & Taghizadeh-Mehrjardi, 2021). در مطالعه‌ی دیگری در اراضی کشاورزی ایتالیا (Adeniyi, Brenning, &

Maerker, 2024) محققان گزارش کردند که مدل RF نسبت به دو مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین یادگیری افراطی^۵ (ELM) کارایی بالاتری داشت و متغیرهای پستی و بلندی مهمترین اهمیت را در پیش‌بینی SOC در اراضی کشاورزی مورد مطالعه داشتند، در همین راستا مطالعات مشابهی توسط (Zeratpisheh et al., 2023) در ایالت ورمونت آمریکا با در نظر گرفتن تغییرات SOC در زمین‌نماها و اراضی با کاربری‌های متنوع، (Matinfar et al., 2021) در اراضی زراعی واقع در مجاورت شهر خرم آباد، (Su et al., 2024) در مناطق جنگلی با اقلیم نیمه‌خشک در ایران و (Garosi, Ayoubi, & Nussbaum, & Sheklabadi, 2022) به بررسی تغییرات SOC زیست‌بوم‌های زراعی و جنگلی در یک منطقه نیمه‌خشک در ایران پرداختند. اما موردی که علی‌رغم موفقیت تحقیقات قبلی در نقشه برداری ویژگی‌های خاک بویژه SOC همچنان در کشورهای در حال توسعه از قبیل ایران بسیار جدی و تأثیرگذار می‌باشد بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی این ویژگی‌ها است، که عمدتاً به دلیل نبود مشاهدات کافی در دوره‌های زمانی گذشته (بویژه سال‌های دور) امکان دسترسی به این داده‌های اطلاعاتی برای تصمیم‌گیری‌های بلند مدت و برنامه‌ریزی‌های آتی را تحت تأثیر قرار داده است (Afshar, Ayoubi, & Jafari, 2018). یکی از راهکارهای غلبه بر این محدودیت در نقشه برداری SOC استفاده از رویکرد مدلسازی معکوس^۶ می‌باشد (Fathizad et al., 2020). در این فرآیند از داده‌های مشاهداتی خاک در زمان حاضر و متغیرهای محیطی برای پیش‌بینی متغیر هدف استفاده می‌گردد و در ادامه مدل مکانی ساخته شده با استفاده از متغیرهای محیطی مانند داده‌های سنجش از دور (RS)، کاربری اراضی و پارامترهای اقلیم که در طی زمان متغیر هستند برای دست یافتن به روند تغییرات گذشته متغیر هدف (به‌عنوان نمونه: SOC) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین راستا در معدود مطالعاتی که محققین به این موضوع پرداخته‌اند، می‌توان به پژوهش‌های مربوط به مدلسازی زمانی مکانی SOC (در سال‌های ۱۹۸۶، ۱۹۹۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶) و شاخص کیفیت خاک (از سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۳۰) با استفاده از مدل RF در دشت اردکان یزد اشاره نمود (Fathizad et al., 2020; 2022). نتایج ایشان بیانگر این بود که تعمیم مدل واسنجی‌شده در سال ۲۰۱۶ به دوره‌های زمانی گذشته ۱۹۸۶، ۱۹۹۹ و ۲۰۱۰ حاکی از کاهش قابل توجه در محتوای SOC به‌ویژه در خاک‌هایی که محتوای SOC قابل توجهی در گذشته داشته و در شرایط فعلی از مساحت آنها کاهش یافته است. این کاهش‌ها را عمدتاً به تغییرات کاربری اراضی و توسعه‌ی فعالیت‌های کشاورزی نسبت داده شد. بنابراین، بر مدیریت بهینه منابع خاک به‌منظور کاهش این اثرات تأکید شده است (Fathizad et al.,

4- Soil organic carbon stocks
5- Extreme Learning Model
6- Inverse Modeling Approach

1- Conventional methods
2- Geostatistics
3- Digital Soil Mapping

(2020).

آنها مزیک^۴ و ترمیک^۵ از غرب به شرق منطقه می‌باشد. مواد مادری تشکیل دهنده‌ی خاک‌های منطقه بر اساس نقشه‌ی زمین‌شناسی با مقیاس (۱:۱۰۰۰۰۰) نیز از نوع رسوبات آبرفتی، کفه‌های رسی، شیل خاکستری و ماسه سنگ است. خاک‌های منطقه در سطح تاکسونومیک رده بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی شامل اینسپتی‌سولز، انتی سولز و اردی‌سولز (Soil Survey Staff, 2022) به‌همراه برخی مناطق با بیرون‌زدگی سنگی می‌باشند.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری آزمایشگاهی

تعداد ۳۰۰ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متری) در حدواسط شهریور تا آبان ماه سال ۱۴۰۳ بر اساس روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین مشروط^۶ (clhs) در حین مطالعه میدانی برداشت گردید. در روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین که در نقشه‌برداری رقومی خاک به‌کار می‌رود، هدف این است که توزیع متغیرهای ورودی به‌طور مؤثری نمونه‌برداری شود. در این پژوهش متغیرهای محیطی مورد استفاده شامل مشتقات پستی و بلندی از قبیل (عمق دره، موقعیت نسبی شیب و ...)، سنجش از دور (مانند شاخص‌های سبزی‌نگی، روشنایی و ...) به‌همراه فاکتورهای اقلیمی بارش و دما بودند. این روش شامل تقسیم‌بندی هر یک از متغیرها به π بخش مساوی است و سپس به‌طور تصادفی از هر بخش یک نمونه انتخاب می‌شود. با این کار، تمامی ناحیه‌های ممکن از فضای متغیرها پوشش داده می‌شود و از بروز نمونه‌های تکراری جلوگیری می‌شود. این روش به‌ویژه در مدل‌سازی‌های پیچیده و در شرایطی که داده‌های کافی در دسترس نیست، به کار می‌رود و به محققان کمک می‌کند تا پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از ویژگی‌های خاک و تغییرات آن در مناطق مختلف داشته باشند. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک و به نرمی کوبیده شده و با عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تجزیه‌های آزمایشگاهی آماده شدند. برای اندازه‌گیری SOC، در گام بعد نمونه‌های خاک به‌طور کامل از الک با اندازه ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شدند. درنهایت بر اساس روش ارائه شده توسط والکلی-بلاک (Walkley & Black, 1934) مقدار SOC اندازه‌گیری شد.

حوضه آبخیز زاینده رود، به‌عنوان یکی از مهمترین حوضه‌های آبریز در مرکز ایران، از تنوع بالای کاربری اراضی و شرایط محیطی برخوردار است. این حوضه به‌دلیل تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی برای میلیون‌ها نفر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Madani, 2007). با این حال، تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های متوالی و فعالیت‌های انسانی در این منطقه، باعث تغییرات قابل توجهی در کیفیت خاک و ذخایر کربن آلی شده است. بنابراین، بررسی تغییرات زمانی و مکانی SOC در این حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، از داده‌های RS و سایر نمایندگان عوامل خاکسازي شامل داده‌های اقلیمی، متغیرهای پستی و بلندی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی SOC استفاده شده است. بنابراین پژوهش حاضر با اهداف، (۱) بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی SOC در لایه سطحی خاک، (۲) شناسایی مهمترین عوامل محیطی پیش‌ران و کلیدی بر پیش‌بینی SOC، (۳) ارزیابی کارایی سه مدل یادگیری ماشین RF، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و درخت تقویت شده با گرادیان افراطی (XGBoost tree) در پیش‌بینی SOC در دوره‌های زمانی مدنظر شامل سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۴ و (۴) مقایسه کارایی دو روش عدم قطعیت بوتسرایت و k-فولد برای کمی‌سازی دقت پیش‌بینی مناسبترین مدل یادگیری ماشین انجام گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی حوضه آبخیز زاینده رود است، که بین عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ} 21' 50''$ تا $35^{\circ} 53' 0''$ طول غربی و $36^{\circ} 24' 31''$ تا $36^{\circ} 41' 33''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از شرق به غرب آن به‌ترتیب ۱۴۰۴ تا ۲۸۶۲ متر متغیر می‌باشد. واحدهای فیزیوگرافی غالب منطقه نیز شامل تپ‌های کوهستان، تپه، واریزه‌های آبرفتی، دشت‌های دامنه‌های و اراضی پست بوده و روند تغییرات شیب منطقه نیز از شرق به غرب منطقه در دامنه‌ی کمتر از ۱٪ تا بیش از ۷۰٪ متغیر می‌باشد. بر اساس داده‌های اقلیمی بلند مدت (۲۵ ساله) برگرفته از نزدیکترین ایستگاه‌های هواشناسی منطقه نیز حداقل و حداکثر بارش و دما به‌ترتیب ۱۲۵ تا ۳۱۰ میلی‌متر و ۱۱ تا ۱۸ درجه‌سانتی‌گراد است و بر اساس روش ارائه شده توسط (Van Wambeke, 2000) در نرم افزار نیوهال^۱ و بررسی نقشه‌های رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران رژیم رطوبتی خاک‌ها به‌ترتیب زیریک^۲ و اریدیک^۳ و رژیم حرارتی

4- Mesic

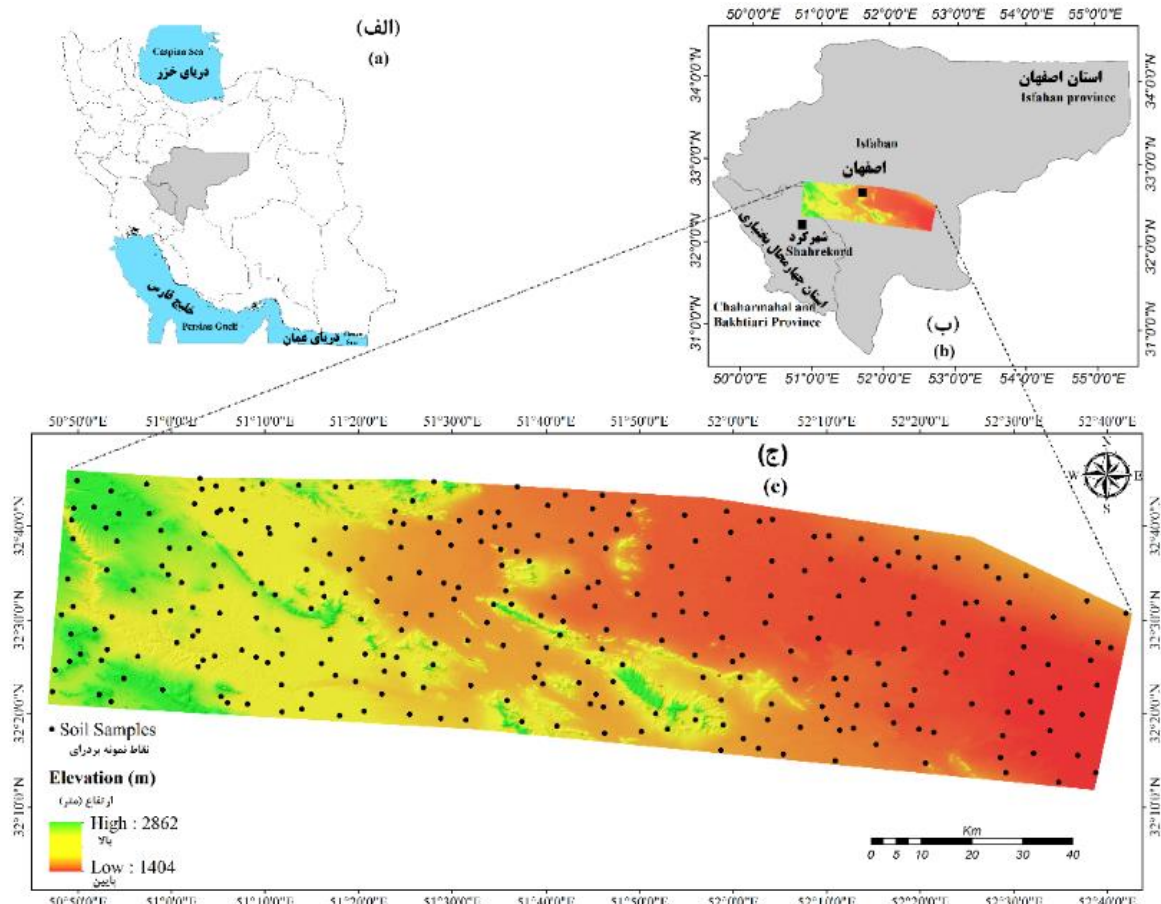
5- Thermic

6- Conditional Latin Hypercube Sampling Method

1- New Hall

2- Xeric

3- Aridic



شکل ۱- (الف) موقعیت منطقه مطالعاتی در کشور، (ب) نسبت به استان‌های اصفهان و چهارمحال بختیاری و (ج) پراکنش نقاط نمونه‌برداری بر روی نقشه تغییرات ارتفاعی (متر)

Figure 1- (a) Location of the study area in the country, (b) relative to Isfahan and Chaharmahal Bakhtiari provinces, and (c) distribution of sampling points on the elevation variation map (m)

آگوست تا نوامبر برای سال‌های ۲۰۲۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰ از محیط سامانه متن باز و بر خط گوگل ارث انجین (GEE) استخراج شدند (Lamichhane, Kumar, & Wilson, 2019; Benslama, Lucas, Jordan Vidal, Almendro-Candel, & Navarro-Pedreño, 2024). از این رو، ۷۰ متغیر کمکی شامل شاخص‌های پوشش گیاهی از نسبت‌های باندی داده‌های RS و همچنین مشتق اولیه و ثانویه DEM در نرم‌افزار GIS SAGA^۲ نسخه ۴/۷ تهیه شد. قبل از اجرای فرآیند مدل‌سازی مکانی، فرآیند انتخاب متغیرهای کمکی محیطی برای به حداقل رساندن تعداد متغیرها و انتخاب مرتبط‌ترین آنها توصیه می‌شود (Ben Brahim & Limam, 2018). برای دستیابی به این هدف، از روش اهمیت متغیرهای محیطی^۳

متغیرهای محیطی و انتخاب آنها

متغیرهای کمکی مورد استفاده شامل مجموعه گسترده‌ای از نمایندگان عوامل خاکسازي بودند، که تا حد امکان از منابع با حداقل هزینه و با دسترسی بالا برای توضیح محتوای SOC جمع‌آوری شدند. آنها شامل ویژگی‌های پستی و بلندی، داده‌های RS، متغیرهای اقلیمی (بارش، حداقل، حداکثر، میانگین دما) و نقشه‌های موضوعی شامل زمین شناسی و کاربری زمین بودند. مدل رقومی ارتفاع^۱ (DEM) با وضوح مکانی ۳۰ متر پایگاه داده از SRTM برای تهیه ویژگی‌های پستی و بلندی دانلود شد. برای شاخص‌های طیفی، میانگین باندهای سنجنده-های Landsat-8 (OLI/TIRS) منطبق با دوره نمونه‌برداری از

1- Digital Elevation Model

2- System for Automated Geoscientific Analysis

3- Relative importance method

رقومی خاک هستند.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی خارجی مدل‌های ماشین یادگیری، از ۲۰٪ از کل داده‌ها برای اعتبارسنجی پیش‌بینی SOC در هر دوره زمانی به عنوان داده‌های مستقل استفاده گردید. شاخص‌های آماری رایج، شامل ضریب تبیین (R^2)، ضریب همبستگی تطابق (CCC)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) برای ارزیابی کارایی مدل‌ها استفاده شدند. هر چه ریشه میانگین مربعات خطا مقدار کوچکتری را نشان دهند، مدل دارای دقت و اعتبار بیشتری است و هر چه مقادیر به صفر نزدیکتر باشد دقت بالاتر است (Ma et al., 2017; Mantero, Moser, & Serpico, 2005). ریشه میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده این است که مقادیر پیش‌بینی شده چقدر به مقادیر مشاهده شده نزدیک هستند. مقادیر بالای R^2 و CCC بالاتر منعکس کننده این است که مدل عملکرد بهتری را در برآورد مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر مشاهداتی ارائه کرده است (Voltz et al., 2020). روابط ریاضی شاخص‌های آماری مورد استفاده در روابط ۱ تا ۴ ارائه شده‌اند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((P_i - O_i)^2)} \quad (2)$$

$$CCC = \frac{2r\sigma_{Pi} \sigma_{Oi}}{\sigma_{Pi}^2 + \sigma_{Oi}^2 + (\bar{P}_i - \bar{O}_i)^2} \quad (3)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (4)$$

که در معادلات بالا P_i و O_i مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هستند، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده شده نسبت به اندازه‌گیری‌های n ، ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، و σ_{Pi}^2 ، σ_{Oi}^2 انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده است (Muslim, Albayati, & Al-Nasri, 2022).

تحلیل عدم قطعیت

در این مطالعه برای تعیین عدم قطعیت پیش‌بینی SOC از روش بوت استرپ k و فولد استفاده شد. روش بوت‌سرایت یکی از روش‌های غیرپارامتریک و شناخته شده برای محاسبه عدم قطعیت مدل‌سازی است (Tibshirani & Efron, 1993). کارکرد روش شامل یک نمونه‌برداری تصادفی همراه با قابلیت جایگزینی از داده‌های موجود می‌باشد. بر اساس این روش هر بار انتخاب تصادفی از داده‌های موجود در بخش واسنجی یک مدل برازش می‌گردد که منجر به پیش‌بینی متغیر

(Mallah, Delsouz Khaki, Davatgar, Poppiel, & Demattê, 2022)

برای تعیین مناسب‌ترین نمایندگان عوامل خاکسازی استفاده شد. در این پژوهش به ترتیب تعداد ۴۶ و ۲۴ متغیر مستخرج از داده‌های پستی و بلندی و طیفی برای پیش‌بینی SOC مورد ارزیابی قرار گرفتند، و آنهایی که مقادیر شاخص عمق حداقل^۱ آنها در مقابل تعداد درختان رگزیون برازش داده شده (۰ تا ۱۰۰۰ عدد) کمتر و همچنین و دارای مقادیر $pvalue$ آنها در همبستگی با متغیر هدف معنی‌دار بود (کمتر از ۰/۰۵) بودند انتخاب شدند (شکل ۲ الف و ب). همچنین نقشه کاربری اراضی برای چهار دوره‌ی زمانی ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۴ و ۲۰۲۴ از محیط سامانه‌ی متن باز گوگل ارث انجین GEE با هدف ارزیابی تأثیر کاربری اراضی بر روی پیش‌بینی SOC تهیه شدند. داده‌های اقلیم و نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز به ترتیب از پایگاه داده جهانی Word Clime و رقومی‌سازی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه (۱:۱۰۰۰۰۰) به عنوان نمایندگان فاکتورهای خاکسازی اقلیم و مواد مادری بر اساس نظر کارشناس استفاده شدند. در نهایت ۳۲ متغیر محیطی به عنوان نمایندگان عوامل خاکسازی برای پیش‌بینی SOC انتخاب گردیدند (جدول ۲).

مدل‌سازی مکانی و زمانی کربن آلی خاک

رویکرد مدل‌سازی مورد استفاده در این پژوهش مدل‌سازی معکوس می‌باشد که از آن به عنوان یک ابزار تحلیلی برای برآورد و تجزیه و تحلیل توزیع SOC استفاده شد. در این روش به منظور شبیه‌سازی و برآورد مقادیر SOC در دوره‌های زمانی که داده‌های خاک در دسترس نیست می‌تواند یک رویکرد کارا و مفید باشد (Fathy et al., 2025). برای برازش این رویکرد از دسته‌ای از متغیرهای محیطی به عنوان نمایندگان عوامل خاکسازی بویژه آنهایی که در طی زمان دارای تغییرات مکانی هستند به همراه سه مدل یادگیری ماشین شامل (Behrens, Zhao et al., SVR, Zhu, Schmidt, & Scholten, 2010) RF (2024) و XGBoost tree (Chen & Guestrin, 2016) برای نقشه برداری تغییرات مکانی SOC در دوره‌های زمانی (۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۴) و ۲۰۰۰) مورد استفاده قرار گرفتند. در این رویکرد از مدل مکانی و زمانی ساخته شده در سال مبنا (۲۰۲۴) که داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده آن موجود می‌باشد برای برآورد SOC در سال‌های ماقبل ۲۰۱۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰ استفاده گردید. کارایی این رویکرد در مطالعات قبلی توسط سایر محققین در کشور ایران از قبیل (Fathzad et al., 2022) و (Fathy et al., 2025) به ترتیب در نقشه‌برداری SOC و شاخص کیفیت خاک مورد تأیید قرار گرفته است. تمام مدل‌های ماشین یادگیری با استفاده از بسته‌های تخصصی موجود در نرم‌افزار تجزیه و تحلیل آماری R (نسخه ۴،۲،۱) پیاده‌سازی شدند. الگوریتم‌های مورد استفاده از محبوب‌ترین مدل‌های یادگیری ماشین برای نقشه‌برداری

است. بر اساس نتایج میانگین مقادیر SOC برابر ۱/۲۹٪ است. ضریب تغییرات (CV) نقش مهمی در ارزیابی تنوع ویژگی‌های خاک در مجموعه داده ایفا می‌کند. در اینجا، طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویلدینگ (۱۹۸۵) برای تعیین میزان تغییرپذیری SOC استفاده شد. با توجه به آماره CV مقادیر بیش از ۳۵٪ آن در کلاس تغییرپذیری بالا، مقادیر حدواسط ۱۵ تا ۳۵ در کلاس متوسط و مقادیر کمتر از ۱۵٪ در کلاس تغییرپذیری کم قرار دادند. بر همین اساس مقدار CV برای SOC بیش‌تر از ۳۵٪ بود که بیانگر تنوع بالای مکانی آن در منطقه مطالعاتی است. تنوع بالا در مقادیر اندازه‌گیری شده SOC به کاربری اراضی، تنوع در پوشش گیاهی و پستی و بلندی، همچنین تنوع در توزیع اندازه ذرات خاک نسبت داده می‌شود (Zaheri Abdehvand, Karimi, Rangzan, & Mousavi, 2024; Song et al., 2017; Rabbi, Roy, Miah, Amin, & Khandakar, 2014). تغییرات ویژگی‌های خاک را در مزارع کشاورزی را به عوامل زمین‌شناسی و پدولوژیکی تشکیل دهنده خاک و عملیات خاک‌ورزی نسبت دادند.

هدف می‌گردد؛ بنابراین با تکرار هر یک از مدل‌ها در هر مرحله در نهایت امکان دستیابی به نقشه احتمال برای هر یک از پیکسل‌ها فراهم می‌گردد. در روش k-فولد نیز کل داده‌های موجود به k زیر بخش با اندازه مساوی تقسیم می‌شوند که به آن fold یا چینه نیز می‌گویند. در هر مرحله یک چینه کنار گذاشته شده و مدل با توجه به سایر چینه‌ها آموزش می‌بیند که در نهایت منجر به ساخت یک مدل یادگیرنده می‌شود. سپس دقت این مدل بر روی هر دسته از داده‌های کنار گذاشته شده بررسی شده و در نهایت میانگین تمام این دقت‌ها به عنوان تخمین مقدار متغیر هدف در هر پیکسل محاسبه می‌شود (Vanwinckelen & Blockeel, 2012).

نتایج و بحث

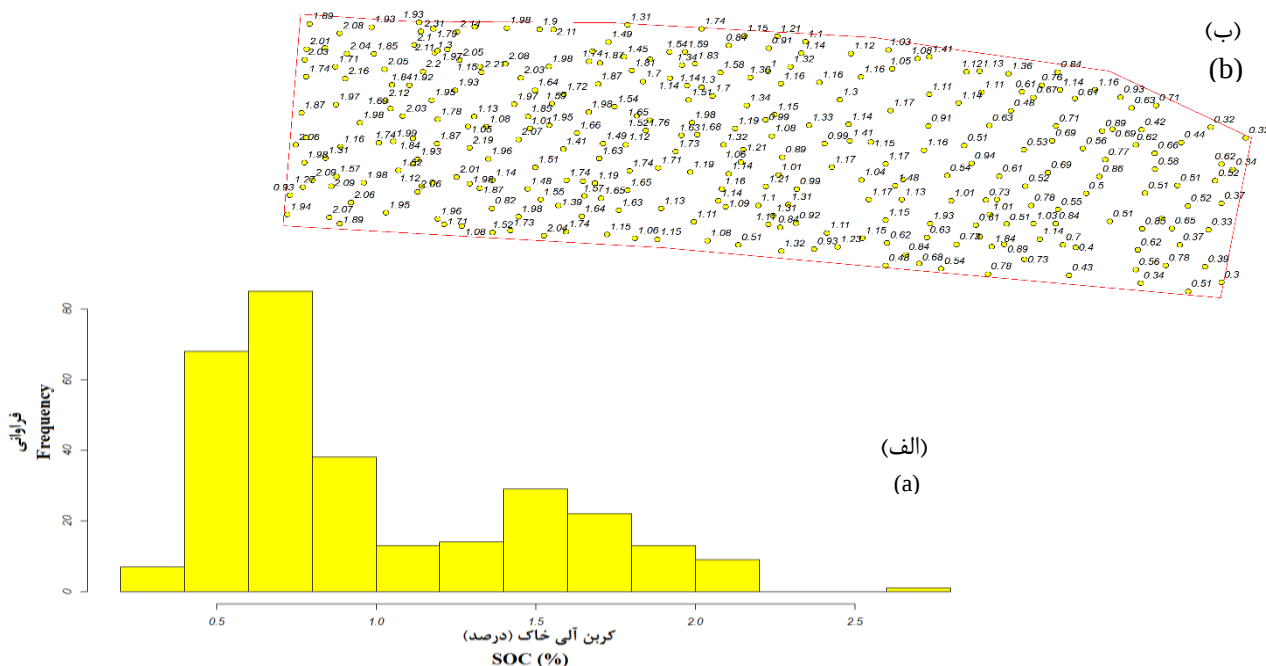
تجزیه و تحلیل آماری وضعیت کربن آلی خاک

خلاصه آماری محتوای SOC در جدول ۱ و نمودار توزیع فراوانی و مقادیر متناظر آن در محل نقاط نمونه‌برداری در شکل ۲ ارائه شده

جدول ۱- آمار توصیفی کربن آلی خاک در خاک‌های مورد مطالعه (n=۳۰۰) در سال ۲۰۲۴

Table 1- Descriptive statistics of soil organic carbon in the studied soils (n=300) in the year 2024

ویژگی	واحد	میانگین	بیشینه	کمینه	میان	انحراف معیار	ضریب تغییرات
Variable	unit	Mean	Maximum	Minimum	Median	Standard deviation	Coefficient of variation
SOC	%	1.29	2.31	0.3	1.17	0.52	40.31



شکل ۲- توزیع فراوانی کربن آلی خاک (الف)، مقادیر متناظر SOC در محل نقاط مشاهده‌ای خاک (ب)

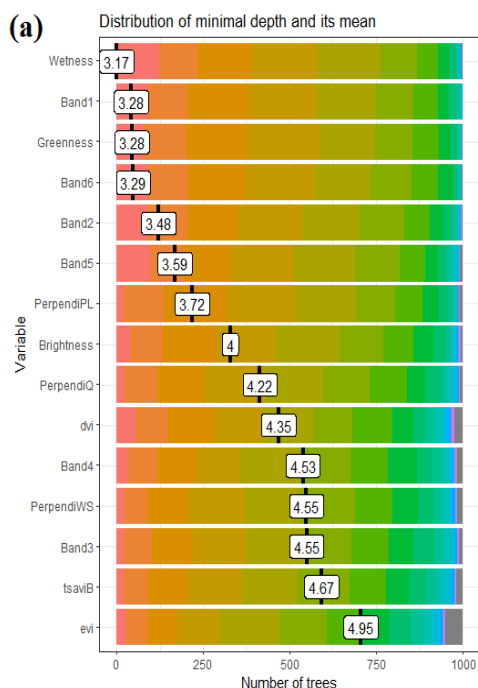
Figure 2- Distribution of SOC frequency (a), and Corresponding SOC values at soil observation points (b)

مشتقات RS و پستی و بلندی بود. در همین راستا (Mallah et al., 2022; Mousavi, Jahandideh Mahjenabadi, Khoshru, & Rezaei, 2024) بر کارایی موفق روش مورد استفاده در این تحقیق برای انتخاب متغیرهای محیطی در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک تأکید نمودند. همچنین چهار متغیر اقلیمی به همراه دو نقشه زمین شناسی و کاربری اراضی نیز براساس نظر کارشناس انتخاب شدند. در مجموع ۳۱ متغیر محیطی به نمایندگی از عوامل خاکساز پستی و بلندی، اقلیم، RS و مواد مادری برای مدل‌سازی زمانی و مکانی SOC استفاده شدند (جدول ۲). نقشه پراکنش مکانی شش عدد از این متغیرها نیز در شکل ۴ ارائه شده است. به‌طور جزئی‌تر در مورد وضعیت کاربری اراضی بر اساس جدول ۳ تغییراتی در مورد کاهش سهم سطح زیرکشت اراضی کشاورزی و باغی (تحت کشت) در طی زمان اتفاق افتاده به‌نحوی که سهم این اراضی در سال ۲۰۰۰ از ۱۲۴۸۵۵ هکتار به ۹۶۴۵۲ هکتار در سال ۲۰۲۴ معادل ۳/۳۸٪ کاهش یافته است که تغییرات در کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل اراضی زراعی به مناطق شهری، تأثیرات قابل توجهی بر محتوای SOC و خدمات زیست‌بومی آن در منطقه دارد.

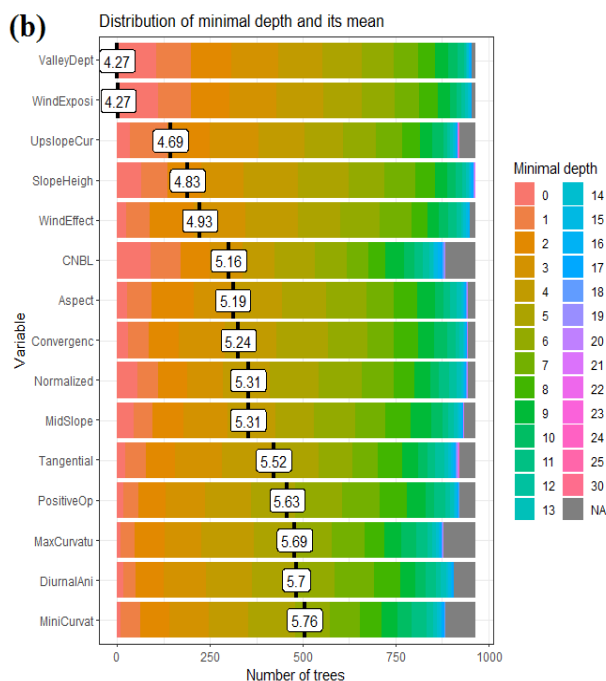
متغیرهای محیطی منتخب

چندین متغیر محیطی بر توزیع ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی تأثیر می‌گذارند، که این متغیرها شامل شاخص‌های RS، پستی و بلندی، آب و هوا و مواد مادری هستند. با این حال، این نوع داده‌ها در بسیاری از مناطق در دسترس نیستند و کاربرد روش‌های DSM را پیچیده می‌کنند (Canero, Rodriguez-Galiano, & Aragones, 2024; Kasraei et al., 2024). بر اساس نتایج انتخاب متغیرهای محیطی در نهایت ۹ و ۱۶ متغیر به‌ترتیب مربوط به داده‌های RS و پستی و بلندی انتخاب شدند (شکل ۳ الف و ب) که همزمان کمترین مقادیر شاخص حداقل عمق و pvalue معنی‌داری با متغیر هدف (SOC) ارائه نمودند انتخاب گردیدند. شایان ذکر است که محور عمودی و افقی در شکل ۳ به‌ترتیب نشان‌دهنده شاخص حداقل عمق و تعداد درختان رگرسیونی است. بر اساس شکل (۲الف) مقادیر کمتر از ۷۵۰ درخت رگرسیونی و در شکل (۲ب) و حداکثر ۵۰۰ درخت رگرسیونی بهینه‌ترین حالت برازش مدل RF در طبق روش انتخاب متغیر اهمیت نسبی در گزینش مناسب

(الف)



(ب)



شکل ۳- فرآیند انتخاب متغیرهای محیطی برای پیش‌بینی SOC. داده‌های RS (الف) و عوامل پستی و بلندی (ب)

Figure 3- Environmental variables selection process for SOC prediction. RS data (a) and, topographic attributes (b)

جدول ۲- متغیرهای محیطی منتخب برای پیش‌بینی کربن آلی خاک

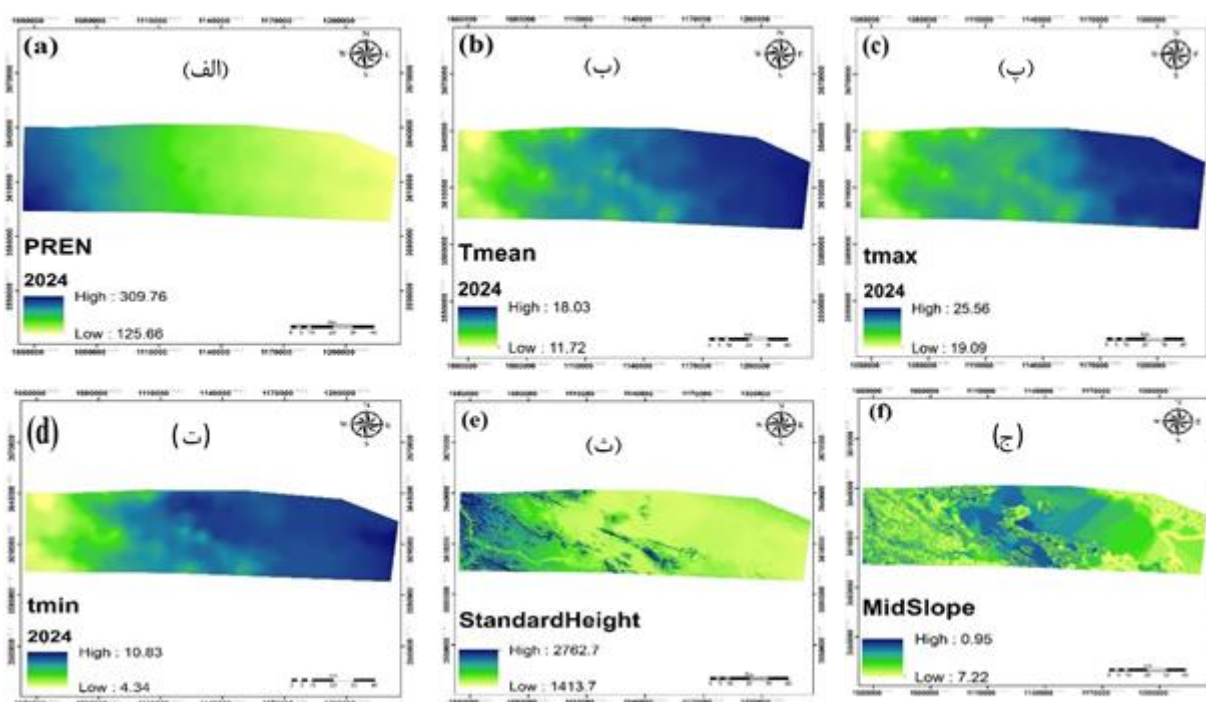
Table 2- Selected environmental variables for predicting soil organic carbon

منبع Source	متغیر کمکی Auxiliary variable	تعریف Definition
پستی و بلندی Topography	Valley depth	عمق دره
	Aspect	جهت شیب
	Convergence index (Convergence)	شاخص همگرایی
	Mid Slope position	موقعیت شیب میانی
	Positive Openness (NegOpp)	باز بودن پستی و بلندی یک مکان منظر را بیان می کند
	Wind Exposition	شاخص بدون بعد مناطق در معرض باد را نشان می دهد
	Plan Curvature (PlanCur)	انحنای در سطح افقی ناحیه شیب دار
	Profile Curvature (ProfileCur)	انحنای در سطح پروفیل
	Wind Effect	شاخص بدون بعد مناطق در معرض باد را نشان می دهد
	Topographic wetness index (Topo Wetness)	شاخص خیسگی پستی و بلندی
سنجش از دور (ماهواره لندست ۸) Remote sensing (Landsat 8 satellite)	Height Normalized	ارتفاع نرمال شده
	Channel Network base Level (CNBL)	فاصله عمودی تا شبکه آبراهه
	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF)	شاخص همواری دره با درجه وضوح بالا
	Slope Height	ارتفاع شیب
	Total Catchment Area	مساحت حوضه آبریز
	Multiresolution Index of the ridge top flatness(MRRTF)	شاخص چند تفکیک پذیری صافی بالای پشته
	Brightness	$((Red)^2 + (NIR)^2)^{0.5}$
	Greenness	$Greenness = -2848 (B2) - 0.2435(B3) - 0.5436(B4) + 0.7243(B5) + 0.0840(B6) - 0.1800(B7)$
	Wetness	$WI = 0.26 \times B2 + 0.21 \times B3 + 0.09 \times B4 + 0.06 \times B5 - B6 \times 0.76 - B7 \times 0.53$
	Bands	Single Bands of landsat_8 (Band 2,3,5,6)
کاربری / پوشش Usage /Cover	) Perpendiculr vegetation index (PrependiPl	شاخص عمود پوشش گیاهی
	Prependiculr vegetation index(PrependiQ)	شاخص عمود پوشش گیاهی
	Land use/cover map	نقشه کاربری /پوشش زمین Usage /Cover
	Geology map (1:100,000)	نقشه زمین شناسی Geology map
اقليم Climate	PREN	بارندگی Precipitation
	Tmean	میانگین دمای سالانه Mean Annual Temperature
	Tmax	بیشترین دمای سالانه Maximum Annual Temperature
	Tmin	کمترین دمای سالانه Minimum Annual Temperature

جدول ۳- تغییرات زمانی و مکانی مساحت هر یک از کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در حوضه آبخیز زاینده رود

Table 3- Temporal and spatial variations in the area of each land use/land cover class from 2000 to 2024 in the Zayandeh Rud watershed

سال Year	اراضی تحت کشت Agricultural lands	اراضی مرتعی و پوشش گیاهی کوتاه Short vegetation cover or Herbaceous vegetation	اراضی مرتعی و پوشش درختی پراکنده Pastureland and scattered tree cover	مناطق مسکونی (Urban)	پهنه‌های آبی (Water body)	پوشش علفی مناطق باتلاقی Herbaceous cover of wetland areas	پوشش درختی مناطق باتلاقی Tree cover of wetland areas
2000	124855	642864	69	68790	229	2523	32
2010	123235	625191	92	88325	211	2266	41
2015	111554	624813	101	100421	325	2086	61
2024	96452	619903	117	120531	299	1997	62



شکل ۴- (الف) بارندگی سالانه برای سال ۲۰۲۴، (ب) میانگین دمای سالانه برای سال ۲۰۲۴، (پ) بیشترین دمای سالانه برای سال ۲۰۲۴، (ت) کمترین دمای سالانه برای سال ۲۰۲۴، (ث) ارتفاع استاندارد شده، (ج) موقعیت نسبی شیب.

Figure 4- (a) Annual precipitation for 2024, (b) Average annual temperature for 2024, (c) Maximum annual temperature for 2024, (d) Minimum annual temperature for 2024, (e) Standardized elevation, (f) Relative slope position

که نشان‌دهنده عملکرد برتر آن در پیش‌بینی SOC در مقایسه با دو مدل دیگر است. بالاترین مقادیر R^2 برای مدل RF برابر با ۰/۷۸ در سال ۲۰۱۵ و ۰/۸۲ در سال ۲۰۲۴ مشاهده گردید. این روند بهبود عملکرد نشان می‌دهد که دقت مدل RF با در دسترس قرار گرفتن

مدل‌سازی زمانی و مکانی کربن آلی خاک

نتایج کارایی مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده در پیش‌بینی SOC بر اساس آماره‌های اعتبارسنجی مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی مدل RF بالاترین مقادیر R^2 را ارائه نموده است،

داده‌های مرتبط با زمان نمونه‌برداری افزایش نشان داد. مدل SVR نیز روند دقت کاهشی در پیش‌بینی SOC با 0.73 در سال 2024 تا 0.66 در سال 2000 نشان داد که بیانگر کاهش کارایی مدل با فاصله از داده‌های مشاهده‌ای در زمان نمونه‌برداری است. در مقابل، مدل XGBoost tree عملکرد نسبتاً پایین‌تری نسبت به دو مدل دیگر با مقادیر R^2 برابر 0.58 در سال 2000 به 0.65 در سال 2024 رسیده است.

این نتیجه نشان‌دهنده‌ی کارایی کمتر مدل XGBoost در پیش‌بینی SOC در مقایسه با مدل‌های RF و SVR بود. البته شایان ذکر است که بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط راسل و مک براتنی (Rossel & McBratney, 2008) کارایی هر سه مدل از نظر کیفیت پیش‌بینی به‌جز در مورد سال 2000 توسط مدل XGBoost خوب می‌باشد و نشان از انتخاب صحیح و کارایی این مدل‌ها در برقراری ارتباط بین SOC و متغیرهای محیطی پیش‌بینی‌کننده در طی دوره‌های مطالعاتی می‌باشند. در همین راستا نتایج ارائه شده در (جدول ۴)، نیز مؤید این است که مدل RF به‌طور کلی بهترین عملکرد را در پیش‌بینی محتوای SOC در طول زمان نشان داده است. این مدل در همه سال‌های مورد بررسی (2000 ، 2010 ، 2015 و 2024) بالاترین مقادیر CCC را داشته، به‌طوری‌که در سال 2024 مقدار این شاخص به

0.85 رسیده است. همچنین، مدل RF کمترین مقادیر RMSE و nRMSE را در مقایسه با دو مدل دیگر SVR و XGBoost داشت. این نتایج در شرایطی است که براساس طبقه‌بندی موجود برای nRMSE کارایی هر سه مدل خوب تا قابل قبول طبقه‌بندی می‌شود. متین‌فر و همکاران (Matinfar et al., 2021) در تحقیقی در مجاورت شهر خرم‌آباد در استان لرستان ضمن مقایسه کارایی چهار مدل یادگیری ماشین، RF، جنگل تصادفی چندگانه، کیوبیست، رگرسیون حداقل مربعات جزئی با رویکرد فازی (SoLIM) در پیش‌بینی SOC بیان داشتند که مدل RF در تلفیق با داده‌های پستی و بلندی و RS کارایی بیشتری را نسبت به دیگر مدل‌های مورد استفاده ارائه نمود. مشابه با تحقیق حاضر در یک مطالعه سری زمانی (1960 تا 2016) به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی SOC در دشت یزد-اردکان، ایران نیز نشان داد که مدل RF ($R^2 = 0.53$) دقیق‌تر از SVR و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی SOC در بازه‌های زمان‌های مختلف عمل نمود. همچنین محققین به اثربخشی RF در پیش‌بینی SOC در مناطق خشک و نیمه‌خشک بویژه در تحلیل‌های مربوط به بررسی روندها در طول زمان اشاره کردند (Fathizad et al., 2022).

جدول ۴- نتایج کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی SOC در در طی دوره‌های زمانی 2000 تا 2024 در حوضه آبخیز زاینده‌رود

Table 4- Results of the efficiency of machine learning models in predicting SOC during the time periods from 2000 to 2024 in the Zayandeh Rood watershed

مدل یادگیری ماشین (۲۰۲۴) Machine Learning Model (2024)	ضریب تبیین R^2	ضریب همبستگی تطابق CCC	ریشه دوم میانگین مربعات خطا RMSE	ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال شده nRMSE
RF (جنگل تصادفی)	0.82	0.85	0.25	19.0
SVR (رگرسیون بردار پشتیبان)	0.73	0.81	0.29	22.48
(درخت تقویت شده با گرادیان افراطی) XGBoost	0.65	0.76	0.31	24.80
مدل یادگیری ماشین (۲۰۱۵) Machine Learning Model (2015)	R^2	CCC	RMSE	nRMSE
RF (جنگل تصادفی)	0.78	0.84	0.26	20.15
SVR (رگرسیون بردار پشتیبان)	0.68	0.82	0.28	21.37
(درخت تقویت شده با گرادیان افراطی) XGBoost	0.64	0.76	0.32	24.80
مدل یادگیری ماشین (۲۰۱۰) Machine Learning Model (2010)	R^2	CCC	RMSE	nRMSE
RF (جنگل تصادفی)	0.72	0.80	0.28	21.70
SVR (رگرسیون بردار پشتیبان)	0.66	0.80	0.29	22.48
(درخت تقویت شده با گرادیان افراطی) XGBoost	0.60	0.72	0.35	27.34
مدل یادگیری ماشین (۲۰۰۰) Machine Learning Model (2000)	R^2	CCC	RMSE	nRMSE
RF (جنگل تصادفی)	0.72	0.77	0.28	21.87
SVR (رگرسیون بردار پشتیبان)	0.66	0.75	0.31	24.21
(درخت تقویت شده با گرادیان افراطی) XGBoost	0.58	0.70	0.33	25.78

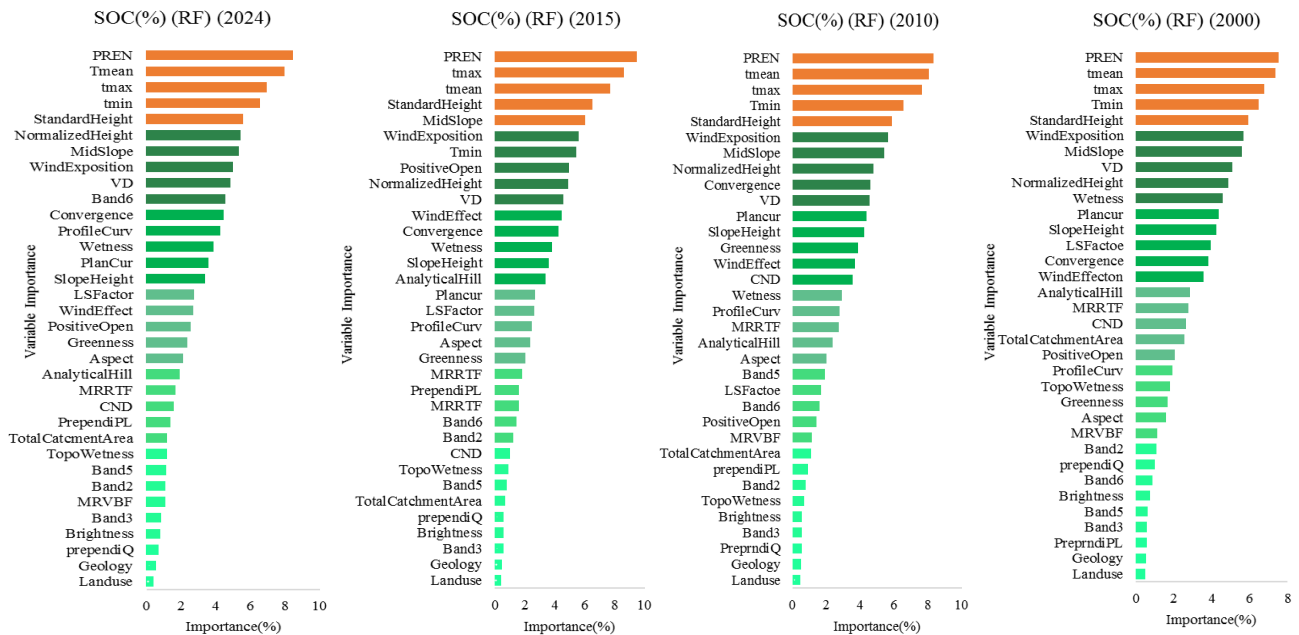
اهمیت نسبی متغیرهای محیطی

اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی SOC بر اساس تجزیه تحلیل انجام شده توسط مدل‌های یادگیری ماشین RF در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل RF بیشترین دقت را در پیش‌بینی SOC در همه دوره‌های زمانی ارائه نمود، بنابراین اولویت‌بندی درجه اهمیت متغیرهای محیطی بر اساس این مدل انجام گردید. به‌طور کلی نتایج اهمیت نسبی متغیرهای محیطی نشان داد که در سال ۲۰۲۴ پنج متغیر محیطی PREN، Tman، Tmax، tmin و StandardHeight با توجیه حدود ۳۵٪ از کل واریانس SOC بیشترین نقش را در پیش‌بینی آن داشتند. برای سال ۲۰۱۵، Tmax، StandardHeight، tmean و Midslope با توجیه ۳۶٪ از تغییرات و برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰ روند مشابه با سال ۲۰۲۴ از نظر درجه‌بندی اهمیت متغیرها مشاهده شد و به‌ترتیب ۳۵ و ۳۳٪ از تغییرات را توجیه نمودند. در همین راستا می‌توان اشاره نمود که شناسایی مهمترین متغیرهای محیطی نسبتاً مشابه در فرآیند مدلسازی SOC می‌تواند به کارایی و قابلیت تعمیم مدل زمانی و مکانی مورد استفاده بیافزاید (Fathizad et al., 2022). بنابراین، چنین بنظر می‌رسد متغیرهای وابسته به عامل خاکساز اقلیم بیشترین نقش را در توجیه تغییرات مکانی SOC داشتند و پس از آن عامل پستی و بلندی Standard Height در درجه اهمیت بعدی قرار داشت. محققین در مطالعات خود وجود رابطه مثبت و معنی‌دار بین میزان بارش با محتوای SOC گزارش نمودند. در همین راستا محققان بر اهمیت نقش عوامل اقلیمی مانند میانگین دما و بارش سالانه بر ذخیره‌سازی میزان کربن آلی در خاک‌های مناطق جنگل تأکید نمودند و دریافتند که این نقش از طریق تأثیر بر میزان فتوسنتز گیاهان و تجزیه مواد آلی خاک اعمال می‌شود (Zhou et al., 2020). به‌طور مشابه (Hoyle, O'Leary, & Murphy, 2016) در مدل‌سازی مکانی SOC مشاهده نمودند که به‌ترتیب متغیرهای اقلیمی و مدیریت اراضی با توجیه ۴۳ و ۳۲٪ از کل تغییرات SOC بیشترین اهمیت را در پیش‌بینی آن داشتند. همچنین در مطالعه‌ای در دشت قزوین موسوی و همکاران (Mousavi, Sarmadian, Omid, & Bogaert, 2022) بیان داشتند که عامل اقلیمی میانگین دمای سالانه به همراه ویژگی‌های خاک (درصد رس، آهک، جرم مخصوص ظاهری) مهمترین متغیرهای موثر در پیش‌بینی آن بودند. همچنین ایشان مشاهده نمودند که متغیر پستی و بلندی StandardHeight از درجه اهمیت بالایی به‌همراه ویژگی‌های خاک و داده‌های اقلیمی در پیش‌بینی SOC برخوردار بود. سایر محققین نیز در مطالعات خود به کارایی مدل RF در مقایسه با سایر مدل‌های یادگیری ماشین تأکید نمودند (Zhao et al., 2024; Masoudi, Mousavi, Rahimabadi,)

(Panahi, & Rahmani, 2023).

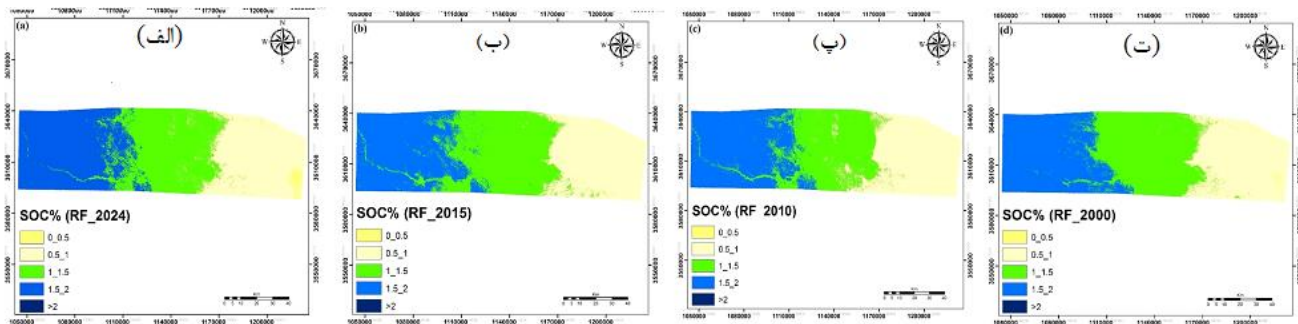
تغییرپذیری مکانی کربن آلی

درک تغییرات مکانی و زمانی SOC برای ارزیابی ذخایر جهانی کربن، ارزیابی سیاست‌های استفاده از زمین و حفظ حاصلخیزی خاک ضروری است (Schillaci et al., 2017). در همین راستا نقشه‌های رقومی تغییرات زمانی و مکانی SOC مربوط به بازه‌های زمانی مورد نظر (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) تهیه و در شکل ۶ ارائه شده است. همچنین جهت تسهیل در درک بهتر تغییرات SOC در طول زمان نقشه‌های پیش‌بینی مکانی بر اساس محتوای SOC به پنج کلاس با دامنه‌های ۰/۵-، ۰/۵-۱/۵، ۱/۵-۲/۵، ۲/۵-۳/۵ و ۳/۵-۴/۵ باز طبقه‌بندی گردیدند (شکل ۶) و مساحت و درصد مربوط به هر یک از آنها در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، بر اساس داده‌های ارائه شده، کلاس پراکنش مکانی ۰/۵-٪ از ۲۰٪ در سال ۲۰۰۰ به ۱/۱٪ در سال ۲۰۱۰ کاهش یافت، اما در سال ۲۰۲۴ به ۲/۲۴٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده گسترش مناطق با کربن آلی بسیار پایین است. کلاس پراکنش مکانی ۱/۵-۰/۵٪ نیز از ۳۰/۴٪ در سال ۲۰۰۰ به ۳۱/۹٪ در سال ۲۰۱۰ افزایش یافت، اما در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۴ به‌ترتیب به ۳۰/۲٪ و ۳۰/۸٪ کاهش و سپس افزایش اندکی داشت، که به نوسانات کیفیت خاک اشاره دارد. کلاس‌های پراکنش مکانی ۱/۵-۱/۰ و ۱/۵-۲/۵ نیز روندهای متفاوتی را نشان دادند. کلاس پراکنش مکانی ۱/۵-۱/۰٪ از ۱۰/۵٪ در سال ۲۰۰۰ به ۳۱/۹٪ در سال ۲۰۱۰ کاهش یافت و سپس در سال ۲۰۱۵ به ۳۷/۰٪ افزایش یافت، اما در سال ۲۰۲۴ به ۳۳/۴۰٪ کاهش یافت، که نشان‌دهنده نوسانات و عدم ثبات در مدیریت SOC است، هرچند که در شرایط کنونی نسبت به دوره بلند مدت روند کاهشی است و بیانگر افزایش خطر تخریب و کاهش حاصلخیزی خاک می‌باشد. کلاس پراکنش مکانی ۱/۵-۲/۵٪ نیز از ۳۴/۱٪ در سال ۲۰۰۰ به ۳۶/۰٪ در سال ۲۰۱۰ افزایش یافت، اما در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۴ به ترتیب به ۳۲/۷٪ و ۳۳/۵٪ کاهش و سپس اندکی افزایش داشت. در نهایت، کلاس پراکنش مکانی ۲/۵-۳/۵٪ مقادیر تغییرات اندکی را نشان می‌دهد، اما از آنجاییکه افزایش SOC بیش از ۱/۵٪ بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط (Charman & Roper, 2007) حاکی از شرایط مطلوب در خاک می‌باشد در روند بلند مدت کاهشی بوده است و کلاس با مقادیر SOC بیش از ۲٪ نیز به طور کلی سهم بسیار ناچیزی در کل مساحت منطقه دارد.



شکل ۵- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی تغییرات مکانی و زمانی SOC خاک سطحی در حوضه آبخیز زاینده رود به‌ترتیب از چپ به راست مربوط به سال‌های ۲۰۲۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۰ است.

Figure 5- Relative importance of environmental variables in predicting spatial and temporal changes in topsoil SOC in the Zayandeh Road watershed
From left to right, it corresponds to the years 2024, 2015, 2010, and 2000.



شکل ۶- نقشه‌های پیش‌بینی مکانی SOC در بازه‌های زمانی مورد مطالعه با استفاده از مدل F
(الف) ۲۰۲۴، (ب) ۲۰۱۵، (پ) ۲۰۱۰ و (ت) ۲۰۰۰

Figure 6- Spatial SOC prediction maps in the studied time periods (2000-2024) using the RF model
a) 2024, b) 2015, c) 2010, and d) 2000

روند دقیقاً با الگوی تغییرات مهمترین متغیرهای محیطی پیش‌بینی کننده از قبیل PREN، Tmax، tmean و tmin همراستا می‌باشد و همچنین با تغییرات تراز ارتفاعی (۱۴۰۴-۲۸۶۲ متر) در منطقه نیز همخوانی دارد، به‌طوری‌که در بخش‌های غربی با حداکثر ارتفاع،

از نظر تغییرات مکانی نیز بیشترین مقدار SOC (۵/۰-۱/۲)؛ تن (رنگ آبی) در بخش‌های غربی، مقادیر متوسط محتوای SOC در مرکز منطقه (۵/۰-۱/۱)؛ تن (رنگ سبز) می‌باشد و مقادیر کم و خیلی کم در بخش‌های شرقی (کمتر از ۱)؛ تن (رنگ زرد) متمرکز می‌باشند. این

بیشترین میزان بارش (۱۲۵-۳۰۹ میلی‌متر) و حداقل دما مقادیر بالای SOC و در بخش‌های مرکزی با کاهش ارتفاع، بارش و افزایش دما

جدول ۵- طبقه‌بندی مقادیر درصد و مساحت تغییرات مکانی SOC در طی سال‌های مورد بررسی (۲۰۲۴-۲۰۰۰)

Table 5- Classification of percentage and area values of spatial changes in SOC during the years under study (2000-2024)

سال Year	محتوای کربن آلی خاک SOC content (%)									
	(0-0.5)		(0.5-1)		(1-1.5)		(1.5-2)		(2-2.5)	
	هکتار Hectare	درصد %	هکتار Hectare	درصد %	هکتار Hectare	درصد %	هکتار Hectare	درصد %	هکتار Hectare	درصد %
2024	18801.7	2.24	258523.2	30.8	280346.6	33.4	281185.9	33.5	503.60	0.06
2015	467.4	0.1	253532.1	30.2	310658.3	37.0	274235.3	32.7	467.9	0.056
2010	703.2	0.1	267898.3	31.9	268002.2	31.9	302248.1	36.0	509.2	0.061
2000	1954.41	0.2	254804	30.4	295704.9	35.2	286430.3	34.1	467.46	0.06

از ۰/۰ تا ۰/۲۳٪ متغیر است، در سال ۲۰۱۵ این مقادیر بین ۰/۰ تا ۰/۲۷٪، در سال ۲۰۱۰ از ۰/۰ تا ۰/۳۳٪ و برای سال ۲۰۰۰ از ۰/۰ تا ۰/۳۸٪ متغیر می‌باشد که بیانگر افزایش تدریجی عدم قطعیت پیش‌بینی از سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۰۰ است که یکی از دلایل آن را می‌توان به افزایش فاصله زمانی بین داده‌های مشاهداتی و متغیرهای محیطی مرتبط دانست (Fathizad et al., 2020) و با نتایج اعتبارسنجی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی SOC همراستا می‌باشد. به‌طور کلی بیشترین میزان عدم قطعیت مربوط به مقادیر بالای SOC در طول دوره‌های زمانی مورد بررسی بود، که تعداد داده‌های مشاهداتی و نیز متغیرهای محیطی مورد استفاده می‌تواند از دلایل آن باشد (Zaho et al., 2024). در مطالعه‌ی مقایسه‌ای رحمانی و همکاران (Rahmani, Sarmadian, & Arefi, 2022) نیز گزارش کردند که روش بوتسراپ نسبت به روش k-فولد از کارایی بیشتری و نتایج منطبق با واقعیت را در پیش‌بینی ضخامت خاک سطحی در دشت قزوین گزارش نمودند. لطف‌اللهی و همکاران (Lotfollahi, Delavar, Biswas, Fatehi, & Scholten, 2023) همچنین بر این باور بودند که روش بوتسراپ تخمین‌های قابل اعتمادی از عدم قطعیت‌های مرتبط با این پیش‌بینی‌ها ارائه می‌دهد. منابع عدم قطعیت می‌تواند مرتبط به خطاهای متغیرهای محیطی، مدل‌یادگیری ماشین مورد استفاده، خطاهای مربوط به نمونه برداری میدانی و تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی است (Nelson, Bishop, Triantafilis, & Odeh, 2011).

نتیجه‌گیری

بر اساس اهداف تحقیق، مدل‌سازی معکوس تغییرات زمانی و مکانی SOC در لایه سطحی خاک با استفاده از متغیرهای محیطی و سه مدل یادگیری ماشین RF، SVR و XGBoost در حوضه آبخیز زاینده رود

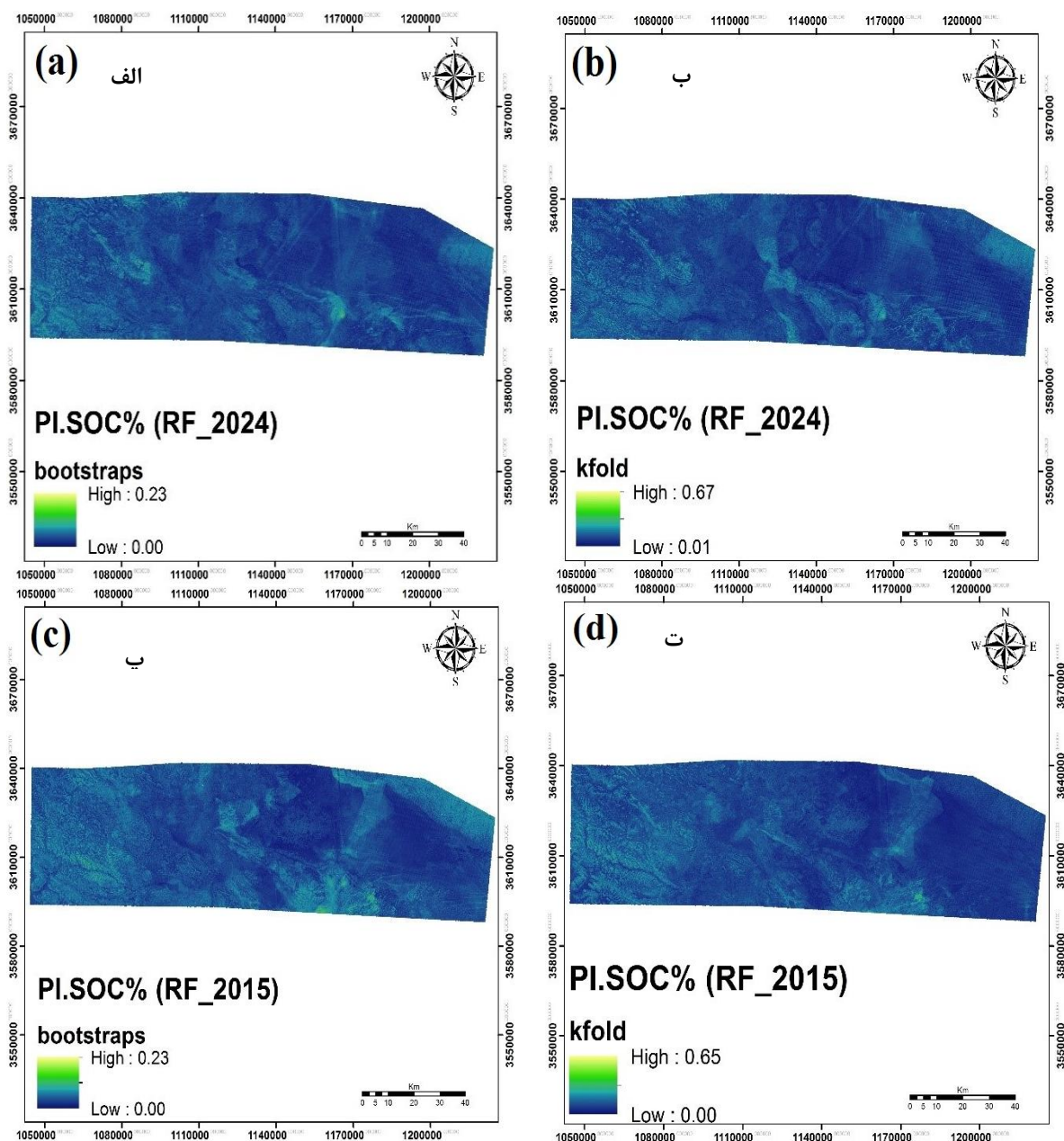
از نظر کاربری اراضی بیشترین تراکم پوشش گیاهی از جمله اراضی زراعی، باغات و مناطق مرتعی با پوشش علفی به‌طور عمده در غرب، جنوب غرب و بصورت یک نوار یا زون در مجاورت رودخانه زاینده رود از غرب به مرکز منطقه می‌باشد. در مقابل از مرکز منطقه به سمت شرق با کاهش سطح اراضی کشاورزی و افزایش مناطق بدون پوشش و یا با پوشش گیاهی بسیار کم مقدار SOC کاهش قابل توجهی نشان داد. همچنین بنظر می‌رسد بدلیل عدم رعایت اصول حفاظت خاک و کاهش سطح اراضی زراعی و توسعه مناطق مسکونی در بلند مدت، همراه با تغییر کاربری اراضی یکی دیگر از دلایل کاهش مناطق با SOC بالا می‌باشد. در در همین راستا همزه پور و همکاران (Hamzehpour, Shafizadeh-Moghadam, & Valavi, 2019) بیشترین محتوای کربن آلی را در مناطق جنگلی و مراتع (علفزارها) گزارش نمودند، همچنین بیان داشتند که در اراضی زراعی محتوای SOC می‌تواند بر اساس نوع مدیریت زمین توسط کشاورزان متغیر باشد.

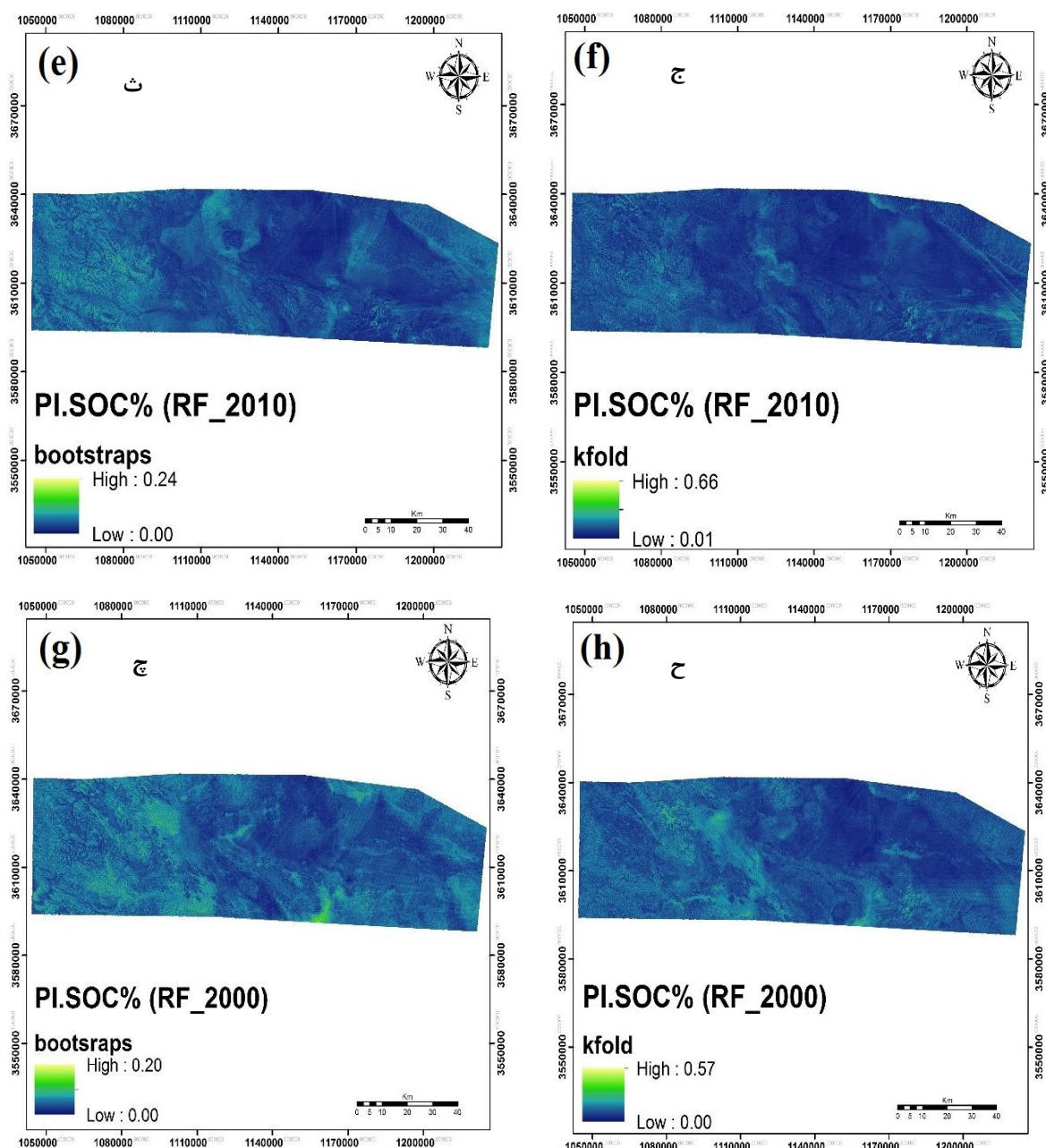
تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی کربن آلی خاک

بر اساس اهداف تحقیق برای بررسی دامن‌های اطمینان پیش‌بینی مدل RF به‌عنوان موفق‌ترین الگوریتم یادگیری ماشین در پیش‌بینی تغییرات زمانی و مکانی SOC بود از دو روش برآورد نقشه‌ی عدم قطعیت پیش‌بین شامل بوتسراپ و k-فولد استفاده گردید (شکل ۷). همچنین نتایج مقایسه‌ی کارایی این دو روش نیز بر اساس دو آماره انحراف معیار (SD) و میانگین عدم قطعیت^۱ کمی‌سازی گردید، و نتایج نشان داد که روش بوتسراپ با مقادیر کمتر هر دو آماره SD و میانگین عدم قطعیت کمتر کارایی بالاتری را نسبت به روش k-فولد ارائه نمود (شکل ۸). همچنین بر اساس نتایج کمی‌سازی شده عدم قطعیت به روش بوتسراپ به‌طور کلی مقادیر حداقل و حداکثر آن در سال ۲۰۲۴

ارائه بالاترین مقادیر R^2 عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر ارائه نمود.

انجام گردید. نتایج ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی SOC بر اساس آماره R^2 نشان داد که، کارایی کلیه مدل‌ها از سال ۲۰۲۴ به سمت ۲۰۰۰ کاهش یافت. با این حال مدل RF با



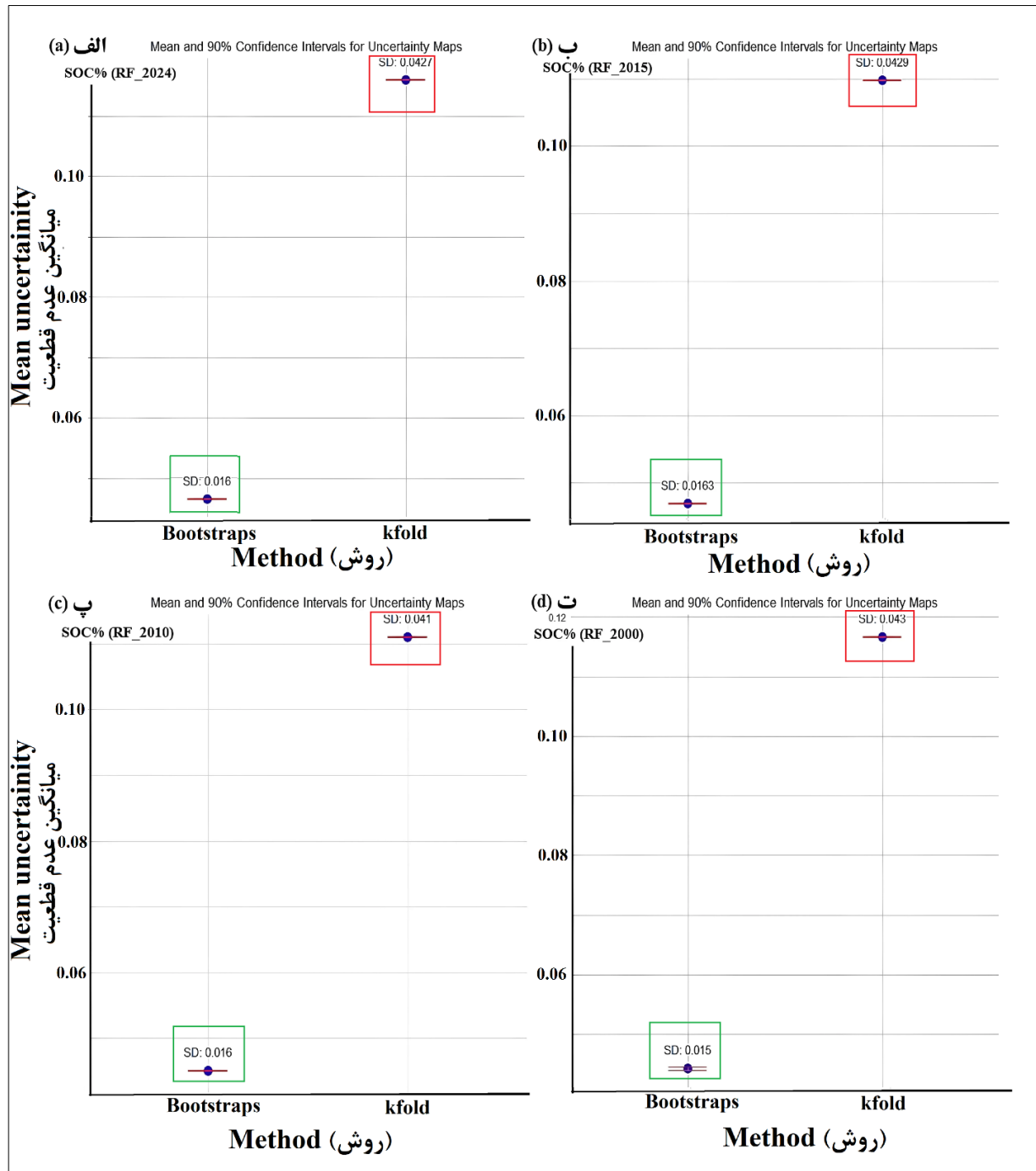


شکل ۷- نقشه‌های عدم قطعیت SOC با دو روش بوتسترپت و k-فولد در بازه‌های زمانی مورد مطالعه با استفاده از مدل RF

بترتیب الف) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش بوتسترپت سال ۲۰۲۴، ب) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش k-فولد سال ۲۰۲۴، ج) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش بوتسترپت سال ۲۰۱۵، د) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش k-فولد سال ۲۰۱۵، ه) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش بوتسترپت سال ۲۰۱۰، و) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش k-فولد سال ۲۰۱۰، ز) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش بوتسترپت سال ۲۰۰۰، ح) نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی SOC به روش k-فولد سال ۲۰۰۰.

Figure 7- Uncertainty maps of SOC using two methods: bootstrap and k-fold over the studied time periods using the RF model

(a) Uncertainty map of SOC prediction using the bootstrap method for 2024, (b) Uncertainty map of SOC prediction using k-fold for 2024, (c) Uncertainty map of SOC prediction using the bootstrap method for 2015, (d) Uncertainty map of SOC prediction using k-fold for 2015, (e) Uncertainty map of SOC prediction using the bootstrap method for 2010, (f) Uncertainty map of SOC prediction using k-fold for 2010 (g) Uncertainty map of SOC prediction using the bootstrap method for 2000, (h) Uncertainty map of SOC prediction using k-fold for 2000.



شکل ۸- مقایسه‌ی کارایی این دو روش بوتسراپت و کافولد برای پیش‌بینی SOC بر اساس دو آماره انحراف معیار (SD) و میانگین عدم قطعیت در بازه‌های زمانی مورد مطالعه با استفاده از مدل RF

باکس سبز و قرمز به‌ترتیب نتایج مدل بوتسراپت و کافولد. به‌ترتیب الف) مقایسه کارایی دو رویکرد عدم قطعیت برای سال ۲۰۲۴، ب) مقایسه کارایی دو رویکرد عدم قطعیت برای سال ۲۰۱۵، پ) مقایسه کارایی دو رویکرد عدم قطعیت برای سال ۲۰۱۰، ت) مقایسه کارایی دو رویکرد عدم قطعیت برای سال ۲۰۰۰.

Figure 8- Comparison of the performance of the two methods, bootstrap and k-fold, for predicting SOC based on two statistics: standard deviation (SD) and mean uncertainty over the studied time periods using the RF model

The green and red boxes represent the results of the bootstrap and k-fold models, respectively. (a) Comparison of the performance of the two uncertainty approaches for the year 2024, (b) Comparison of the performance of the two uncertainty approaches for the year 2015, (c) Comparison of the performance of the two uncertainty approaches for the year 2010, (d) Comparison of the performance of the two uncertainty approaches for the year 2000.

نشان‌دهنده نوسانات و تغییرات قابل توجهی در کیفیت خاک در طول زمان است. به‌طور کلی، افزایش مساحت مناطق با محتوای SOC بسیار پایین (۵۰-٪) و تخریب خاک، در کنار نوسانات در کیفیت خاک، حاکی از عدم ثبات در مدیریت کربن آلی و خطرات ناشی از تخریب و کاهش حاصلخیزی خاک می‌باشد. همچنین، تغییرات مکانی در محتوای SOC با الگوهای تغییرات مکانی فاکتورهای اقلیمی و پستی و بلندی همخوانی داشت، به‌طوری‌که مناطق با بارش بیشتر و دمای پایین‌تر، SOC بالاتری را نشان می‌دهند. در نهایت، کاربری اراضی و کاهش سطح اراضی زراعی نیز به‌عنوان دیگر عوامل مؤثر که حاکی از نقش انسان در کاهش محتوای SOC در عمق سطحی خاک‌های مورد مطالعه در حوضه آبخیز زاینده رود شناسایی شده‌اند. در پایان پیشنهاد می‌گردد رویکرد مورد استفاده در این پژوهش برای یافتن روند تغییرات مکانی سایر ویژگی‌های کلیدی و مؤثر بر کیفیت خاک با استفاده از متغیرهای محیطی و مدل RF در طول زمان مورد استفاده قرار گیرد.

بالاترین مقادیر R^2 برای مدل RF به‌ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۱۵ بود. مدل SVR نیز عملکردی حدواسط را ارائه نمود اگرچه مدل XGBoost tree عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری را نسبت به دو مدل دیگر داشت. با این حال، هر سه مدل یادگیری ماشین مورد استفاده از نظر کیفیت پیش‌بینی عملکرد خوبی داشتند و این نتیجه نشان‌دهنده انتخاب مناسب آنها در برقراری ارتباط بین SOC و متغیرهای محیطی پیش‌بینی‌کننده هستند. همچنین نتایج ارزیابی کمی عدم قطعیت پیش‌بینی SOC نشان داد که روش بوتسرایت با مقادیر کمتر هر دو آماره SD و میانگین عدم قطعیت کارایی بالاتری را نسبت به روش k-فولد ارائه نمود. در مورد اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی SOC نتایج تجزیه و تحلیل در تمامی بازه‌های زمانی نشان داد عوامل اقلیمی و سپس عوامل وابسته به پستی و بلندی بیشترین نقش را نسبت به دیگر متغیرهای محیطی (کاربری اراضی، زمین‌شناسی و RS) در توجیه تغییرات مکانی SOC داشتند. نتایج تحلیل تغییرات مکانی SOC نیز

References

- Adedeji, O.H. (2019). Geospatial information as a tool for soil resource information, management and decision support in Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(12), 2107-2116. <https://doi.org/10.4314/jasem.v23i12.5>
- Adeniyi, O.D., Brenning, A., & Maerker, M. (2024). Spatial prediction of soil organic carbon: Combining machine learning with residual kriging in an agricultural lowland area (Lombardy region, Italy). *Geoderma*, 448, 116953. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116953>
- Afshar, F.A., Ayoubi, S., & Jafari, A. (2018). The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran. *Geoderma*, 315, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.030>
- Behrens, T., Zhu, A.X., Schmidt, K., & Scholten, T. (2010). Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155(3-4), 175-185. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.07.010>
- Ben Brahim, A., & Limam, M. (2018). Ensemble feature selection for high dimensional data: a new method and a comparative study. *Advances in Data Analysis and Classification*, 12(4), 937-952. <https://doi.org/10.1007/s11634-017-0285-y>
- Benslama, A., Lucas, I.G., Jordan Vidal, M.M., Almendro-Candel, M.B., & Navarro-Pedreño, J. (2024). Carbon and nitrogen stocks in topsoil under different land use/land cover types in the southeast of Spain. *AgriEngineering*, 6(1), 396-408. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010024>
- Canero, F.M., Rodriguez-Galiano, V., & Aragonés, D. (2024). Machine learning and feature selection for soil spectroscopy. An evaluation of random forest wrappers to predict soil organic matter, clay, and carbonates. *Heliyon*, 10(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30228>
- Charman, P.E.V., & Roper, M.M. (2007). *Soil organic matter*. In: Charman, P.E.V. and Murphy, B.W., Eds., *Soils—Their Properties and Management*, 3rd Edition, Oxford University Press, Melbourne, 276-285.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 785-794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Fathizad, H., Ardakani, M.A.H., Heung, B., Sodaiezadeh, H., Rahmani, A., Fathabadi, A., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators*, 118, 106736. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106736>
- Fathizad, H., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Hakimzadeh Ardakani, M.A., Zeraatpisheh, M., Heung, B., & Scholten, T. (2022). Spatiotemporal assessment of soil organic carbon change using machine-learning in arid regions. *Agronomy*, 12(3), 628. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030628>
- Fathy, H., Heydari, M., Fathizad, H., Hosseinzadeh, J., Najafifar, A., Mousavi, S.R., & Heung, B. (2025). From

- forest to farmland: Tracking time series variations in soil quality in semiarid oak forest. *Geoderma Regional*, 42, e00974. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00974>
13. Garosi, Y., Ayoubi, S., Nussbaum, M., & Sheklabadi, M. (2022). Effects of different sources and spatial resolutions of environmental covariates on predicting soil organic carbon using machine learning in a semi-arid region of Iran. *Geoderma Regional*, 29, e00513. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00513>
 14. Hoyle, F.C., O'Leary, R.A., & Murphy, D.V. (2016). Spatially governed climate factors dominate management in determining the quantity and distribution of soil organic carbon in dryland agricultural systems. *Scientific Reports*, 6(1), 31468. <https://doi.org/10.1038/srep31468>
 15. Hamzehpour, N., Shafizadeh-Moghadam, H., & Valavi, R. (2019). Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture. *Catena*, 182, 104141. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104141>
 16. Kasraei, B., Schmidt, M.G., Zhang, J., Bulmer, C.E., Filatow, D.S., Pennell, T., & Heung, B. (2024). A framework for optimizing environmental covariates to support model interpretability in digital soil mapping. *Geoderma*, 445, 116873. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116873>
 17. Kulikova, A.I., Chechenkov, P.D., Osipova, M.S., Shopina, O.V., & Semenov, I.N. (2023). Comparative analysis of the results of traditional and digital large-scale soil mapping on the example of a key site in the Smolenskoe Poozerye National Park. *Eurasian Soil Science*, 56(3), 271-277. <https://doi.org/10.1134/s1064229322602281>
 18. Laban, P., Metternicht, G., & Davies, J. (2018). Soil biodiversity and soil organic carbon: keeping drylands alive. *Gland, Switzerland: IUCN*, 10. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.03.en>
 19. Lamichhane, S., Kumar, L., & Wilson, B. (2019). Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma*, 352, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.031>
 20. Lotfollahi, L., Delavar, M.A., Biswas, A., Fatehi, S., & Scholten, T. (2023). Spectral prediction of soil salinity and alkalinity indicators using visible, near-, and mid-infrared spectroscopy. *Journal of Environmental Management*, 345, 118854. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118854>
 21. Ma, Z., Shi, Z., Zhou, Y., Xu, J., Yu, W., & Yang, Y. (2017). A spatial data mining algorithm for downscaling TMPA 3B43 V7 data over the Qinghai-Tibet Plateau with the effects of systematic anomalies removed. *Remote Sensing of Environment*, 200, 378-395. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.023>
 22. Madani, K. (2007, May). Water Transfer and watershed development: A system dynamics approach. In World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat (pp. 1-15). [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)551](https://doi.org/10.1061/40927(243)551)
 23. Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S.B. (2005). Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 559-570. <http://doi.org/10.1109/TGRS.2004.842022>
 24. Mallah, S., Delsouz Khaki, B., Davatgar, N., Poppiel, R.R., & Demattê, J.A. (2022). Digital mapping of topsoil texture classes using a hybridized classical statistics-artificial neural networks approach and relief data. *AgriEngineering*, 5(1), 40-64. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010004>
 25. Masoudi, R., Mousavi, S.R., Rahimabadi, P.D., Panahi, M., & Rahmani, A. (2023). Assessing data mining algorithms to predict the quality of groundwater resources for determining irrigation hazard. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2), 319. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10909-9>
 26. Matinfar, H.R., Maghsodi, Z., Mousavi, S.R., & Rahmani, A. (2021). Evaluation and prediction of topsoil organic carbon using machine learning and hybrid models at a Field-scale. *Catena*, 202, 105258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105258>
 27. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Angelini, M.E., Bogaert, P., & Omid, M. (2023). Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. *Catena*, 232, 107392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107392>
 28. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2022). Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>
 29. Mousavi, S.R., Jahandideh Mahjenabadi, V.A., Khoshru, B., & Rezaei, M. (2024). Spatial prediction of winter wheat yield gap: agro-climatic model and machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1309171. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1309171>
 30. Muslim, W.A., Albayati, T.M., & Al-Nasri, S.K. (2022). Decontamination of actual radioactive wastewater containing 137Cs using bentonite as a natural adsorbent: equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. *Scientific Reports*, 12(1), 13837. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18202-y>
 31. Nelson, M.A., Bishop, T.F.A., Triantafilis, J., & Odeh, I.O.A. (2011). An error budget for different sources of error

- in digital soil mapping. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 417-430. <https://doi.org/10.1111/j.13652389.2011.01365.x>
32. Parras-Alcántara, L., Díaz-Jaimes, L., & Lozano-García, B. (2015). Management effects on soil organic carbon stock in Mediterranean open rangelands—treeless grasslands. *Land Degradation & Development*, 26(1), 22-34. <https://doi.org/10.1002/ldr.2269>
33. Rabbi, S.M.F., Roy, B.R., Miah, M.M., Amin, M.S., & Khandakar, T. (2014). Spatial variability of physical soil quality index of an agricultural field. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014(1), 379012. <https://doi.org/10.1155/2014/379012>
34. Rahmani, A., Sarmadian, F., & Arefi, H. (2022). Digital mapping of top-soil thickness and associated uncertainty using machine learning approach in some part of arid and semi-arid lands of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(3), 585-602. <https://doi.org/10.47176/jwss.24.2.32993>
35. Rossel, R.V., & McBratney, A.B. (2008). Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In *Digital soil mapping with limited data* (pp. 165-172). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_13
36. Rostaminia, M., Rahmani, A., Mousavi, S.R., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Maghsodi, Z. (2021). Spatial prediction of soil organic carbon stocks in an arid rangeland using machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09543-8>
37. Schillaci, C., Acutis, M., Lombardo, L., Lipani, A., Fantappie, M., Märker, M., & Saia, S. (2017). Spatio-temporal topsoil organic carbon mapping of a semi-arid Mediterranean region: The role of land use, soil texture, topographic indices and the influence of remote sensing data to modelling. *Science of the Total Environment*, 601, 821-832. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.239>
38. Song XiaoDong, S.X., Liu Feng, L.F., Zhang GanLin, Z.G., Li DeCheng, L.D., Zhao YuGuo, Z.Y., & Yang JinLing, Y.J. (2017). Mapping soil organic carbon using local terrain attributes: a comparison of different polynomial models. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60445-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60445-4)
39. Su, L., Heydari, M., Jaafarzadeh, M.S., Mousavi, S.R., Rezaei, M., Fathizad, H., & Heung, B. (2024). Incorporating forest canopy openness and environmental covariates in predicting soil organic carbon in oak forest. *Soil and Tillage Research*, 244, 106220. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106220>
40. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Neupane, R., Sood, K., & Kumar, S. (2017). Artificial bee colony feature selection algorithm combined with machine learning algorithms to predict vertical and lateral distribution of soil organic matter in South Dakota, USA. *Carbon Management*, 8(3), 277-291. <https://doi.org/10.1080/17583004.2017.1330593>
41. Tibshirani, R.J., & Efron, B. (1993). An introduction to the bootstrap. *Monographs on Statistics and Applied Probability*, 57(1), 1-436.
42. Van Wambeke, A.R. (2000). The Newhall simulation model for estimating soil moisture and temperature regimes. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, Ithaca, NY.
43. Vanwinckelen, G., & Blockeel, H. (2012). On estimating model accuracy with repeated cross-validation. In *BeneLearn 2012: Proceedings of the 21st Belgian-Dutch conference on machine learning* (pp. 39-44).
44. Vasiliniuc, I., Patriche, C.V., Pîrnău, R., & Roșca, B. (2013). Statistical spatial models of soil parameters. An approach using different methods at different scales. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(3), 457-464. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.057>
45. Voltz, M., Arrouays, D., Bispo, A., Lagacherie, P., Laroche, B., Lemerrier, B., & Schnebelen, N. (2020). Possible futures of soil-mapping in France. *Geoderma Regional*, 23, e00334. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00334>
46. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
47. Yang, L., Jia, W., Shi, Y., Zhang, Z., Xiong, H., & Zhu, G. (2020). Spatiotemporal differentiation of soil organic carbon of grassland and its relationship with soil physicochemical properties on the northern slope of Qilian mountains, China. *Sustainability*, 12(22), 9396. <https://doi.org/10.3390/su12229396>
48. Zaheri Abdehvand, Z., Karimi, D., Rangzan, K., & Mousavi, S.R. (2024). Assessment of soil fertility and nutrient management strategies in calcareous soils of Khuzestan province: a case study using the Nutrient Index Value method. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6), 503. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12665-4>
49. Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bodaghabadi, M.B., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., & Xu, M. (2020). Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. *Catena*, 188, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104424>
50. Zhao, S., Ayoubi, S., Mousavi, S.R., Mireei, S.A., Shahpouri, F., Wu, S.X., & Tian, C.Y. (2024). Integrating proximal soil sensing data and environmental variables to enhance the prediction accuracy for soil salinity and

- sodicity in a region of Xinjiang Province, China. *Journal of Environmental Management*, 364, 121311. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121311>
51. Zhou, T., Geng, Y., Chen, J., Liu, M., Haase, D., & Lausch, A. (2020). Mapping soil organic carbon content using multi-source remote sensing variables in the Heihe River Basin in China. *Ecological Indicators*, 114, 106288. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106288>

Research Article

Vol. 39, No. 3, Jul.-Agu. 2025, p. 313-327

Analysis of Temperature and Precipitation Trends and Their Impact on the Reproductive and Vegetative Thresholds and Cultivation Range of Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.)

M. Asadi ^{1*}

1- Department of Geography Education, Farhangian University, P.O. Box 14665-889, Tehran, Iran

(*- Corresponding Auteur Email: Asadi.m@cfu.ac.ir)

Received: 03 March 2025

Revised: 01 April 2025

Accepted: 24 June 2025

Available Online: 24 June 2025

How to cite this article:

Asadi, M. (2025). Analysis of temperature and precipitation trends and their impact on the reproductive and vegetative thresholds and cultivation range of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.). *Journal of Water and Soil*, 39(3), 313-327. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92455.1473>

Introduction

Human activities and the substantial increase in greenhouse gas concentrations-particularly carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) have exacerbated global warming and triggered significant alterations in climatic patterns. Consequently, climate change has emerged as a critical challenge for natural resource management and agricultural systems in recent decades. These changes, especially temperature and precipitation fluctuations, directly impact plant phenological and vegetative cycles and may even shift the suitable geographical ranges for cultivating certain plant species. Among these species is *Ziziphus jujuba* Mill. (Family: Rhamnaceae), a medicinally valuable plant that exhibits relative adaptability to arid and semi-arid climates, such as those in Iran. However, it remains vulnerable to climate change impacts. Historically cultivated in South Khorasan Province, this region now accounts for over 72% of Iran's jujube production. Investigating climatic trends and their effects on the reproductive and vegetative thresholds of *Ziziphus jujuba* is both scientifically and practically significant. Such analyses enhance our understanding of regional climate change dynamics and facilitate predictive assessments of its agricultural consequences. Therefore, the objective of the present study was to identify the reproductive and vegetative thresholds of jujube throughout the year in the counties of South Khorasan Province and to spatially analyze these thresholds in terms of temperature and precipitation, both under baseline conditions and future scenarios influenced by trends in temperature and precipitation changes.

Material and Methods

In this study, the modified Mann-Kendall test, Sen's slope estimator, and linear regression analysis were employed to analyze trends in data related to determining the cultivation range of the jujube plant. The study data included monthly temperature and precipitation averages from seven synoptic stations within the study area, covering a statistical period of 25 years from 2000 to 2024. These data were extracted from the National Meteorological Organization and served as the foundation for the study. Station data were converted into z-scores using the modified Mann-Kendall test in Minitab software. Additionally, linear trends of variables such as minimum temperature, maximum temperature, mean temperature, precipitation, sunshine hours, and hot days, along with their corresponding slopes, were examined.



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92455.1473>

Results and Discussion

Jujube plants, like other plant species, require specific temperature ranges for optimal growth during different vegetative and reproductive stages. This study examined the thermal thresholds that impact the growth of jujube trees. It was found that 25°C was the threshold at which reproductive growth stops, while 40°C was the threshold for the cessation of vegetative growth. Additionally, the biological zero for jujube growth had been established at 11°C, and this plant can tolerate low temperatures down to -33°C. Some studies have even reported the plant's ability to withstand temperatures as low as -40°C. In this research, each of the seven studied stations in the region was individually analyzed in terms of maximum temperatures and critical points leading to the cessation of vegetative and reproductive growth.

Conclusion

The findings revealed that the Zirkuh station, with an average annual precipitation of 182.8 mm, received the highest rainfall among the studied stations. Nevertheless, even at this station, jujube plants required supplementary irrigation of 267.2 mm. Fortunately, the region's climatic conditions were characterized by rare and minimal summer rainfall, a phenomenon that could otherwise cause fruit cracking, making this area particularly suitable for jujube cultivation. Analysis of climatic data from 2000 to 2024 demonstrated significant spatial heterogeneity in temperature trends. Modified Mann-Kendall test results indicated a warming trend across all stations, with the most pronounced increase observed in Nehbandan station (3.43°C) and the least in Zirkuh station (0.94°C). These spatial variations can be attributed to altitudinal differences, geographical positioning, and localized microclimatic conditions. Sen's slope estimator corroborated these findings, showing the steepest positive slope in Ferdows station (0.24) and the gentlest in Khosf station (0.03). Linear regression analysis revealed a decadal temperature increase ranging from 0.07°C in Birjand and Zirkuh stations to 2.48°C in Nehbandan station. Statistical analysis of p-values demonstrated significant spatial patterns in temperature changes. While northern and central stations (e.g., Birjand, Boshruyeh, and Ghaen; $p \leq 0.05$) show no significant trend, southern stations, particularly Nehbandan ($p \leq 0.02$), exhibited statistically significant warming. Regarding precipitation, all stations showed decreasing trends, with a maximum reduction in Nehbandan (-3.32 mm) and a minimum in Birjand (-0.63 mm). Sen's slope analysis indicated the steepest decline in Ferdows (-0.34) and the mildest in Zirkuh (-0.13). Regression analysis estimates an annual precipitation decreased ranging from 0.04 mm/decade in Zirkuh to 1.80 mm/decade in Ghaen. Statistically, northern and central stations ($p \leq 0.05$) show significant drying trends, while southern stations like Nehbandan ($p = 0.28$) exhibited no statistically significant trend.

Keywords: Jujube, Precipitation, South Khorasan, Temperature, Trend analysis

تحلیل روند تغییرات دمایی و بارشی و تأثیر آن بر آستانه‌های زایشی و رویشی و محدوده کشت گیاه عناب

مهدی اسدی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۳

چکیده

در این مطالعه، آستانه‌های زایشی و رویشی گیاه عناب در طول فصول مختلف در شهرستان‌های استان خراسان جنوبی بررسی شد و تغییرات روند دما و بارش تحلیل و پهنه‌بندی گردید. داده‌های مورد استفاده شامل میانگین ماهانه دما و بارش، ساعت آفتابی و روزهای داغ از ۷ ایستگاه همدید با دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) بود که از سازمان هواشناسی کشور استخراج شد. برای تحلیل روند، از آزمون‌های من-کندال تصحیح شده، تخمین گر شیب سن و رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج نشان داد که به جز ایستگاه‌های نهبندان (در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست) و بشرویه (در جولای)، سایر ایستگاه‌ها در هیچ زمانی از نظر دمای حداکثر دچار توقف رویشی نشدند. با این حال، تمام ایستگاه‌ها از ماه مارس تا اکتبر از نظر رشد زایشی متوقف شدند. بیشترین دمای ثبت شده در جنوب شرقی استان، به ویژه در ایستگاه نهبندان، مشاهده شد، در حالی که مناطق مرکزی، شمال و شمال شرق از نظر دمایی مستعدتر بودند. بررسی بارش سالانه نشان داد که ایستگاه زیرکوه با ۱۸۲/۸ میلی‌متر بارش سالانه، بیشترین میزان را دارد، که بیانگر نیاز عناب به آبیاری مکمل ۲۶۷/۲ میلی‌متری است. تحلیل مقادیر P-value برای میانگین دما نشان دهنده تغییرات فضایی معنادار است، به طوری که ایستگاه‌های بیرجند، بشرویه و قاین ($p \leq 0.05$) در شمال و مرکز استان، فاقد روند معناداری آماری بوده است، در حالی که ایستگاه‌های جنوبی‌تر مانند نهبندان ($p = 0.02$) دارای روند قوی معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد. همچنین تحلیل مقادیر P-value برای میانگین بارش نشان دهنده این است که ایستگاه‌های بیرجند، بشرویه و زیرکوه و قاین ($p \leq 0.05$) در شمال و مرکز استان، روند قوی معناداری آماری بوده است، در حالی که ایستگاه‌های جنوبی‌تر مانند نهبندان ($p = 0.28$) فاقد روند معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد. همچنین از نظر نمره Z من-کندال تصحیح شده بیشترین میزان افزایش دما در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۴۳ و کمترین آن در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۹۴ مشاهده شده است. در مورد روند بارش، نتایج آزمون من-کندال تصحیح شده حاکی از کاهش بارش در تمامی ایستگاه‌ها طی دوره مورد بررسی است. بیشترین کاهش بارش در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۳۲ و کمترین کاهش در ایستگاه بیرجند با مقدار ۰/۶۳ ثبت شده است. در کل کاهش بارش، افزایش ساعات آفتابی و روزهای داغ، نشان دهنده تشدید تابش خورشید، تبخیر-تعرق و خشکی محیط است. در کنار کاهش بارش، روند افزایشی ساعات آفتابی و روزهای داغ حاکی از افزایش میزان تابش خورشید و افزایش میزان تبخیر-تعرق و خشکی بیشتر محیط است.

واژه‌های کلیدی: بارش، تحلیل روند، خراسان جنوبی، دما، عناب

مقدمه

گرمایش جهانی و بروز تغییرات عمده در الگوهای آب‌وهوایی شده‌اند (Pawlak & Kołodziejczak, Alston & Pardey, 2014; 2020). لذا تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی مطرح شده است. این تغییرات، به ویژه نوسانات دما و بارش، تأثیرات مستقیمی بر چرخه‌های زایشی و رویشی گیاهان داشته و حتی ممکن است محدوده‌های جغرافیایی مناسب برای کشت برخی گونه‌های گیاهی را درگون سازد. در این میان، درخت عناب با نام علمی *Ziziphus jujuba* Mill، متعلق به خانواده Rhamnaceae، به عنوان یک گونه با ارزش

فعالیت‌های بشری و افزایش چشمگیر غلظت گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن، موجب تشدید پدیده

۱- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۱۴۶۶۵-۸۸۹، تهران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: Asadi.m@cfu.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92455.1473>

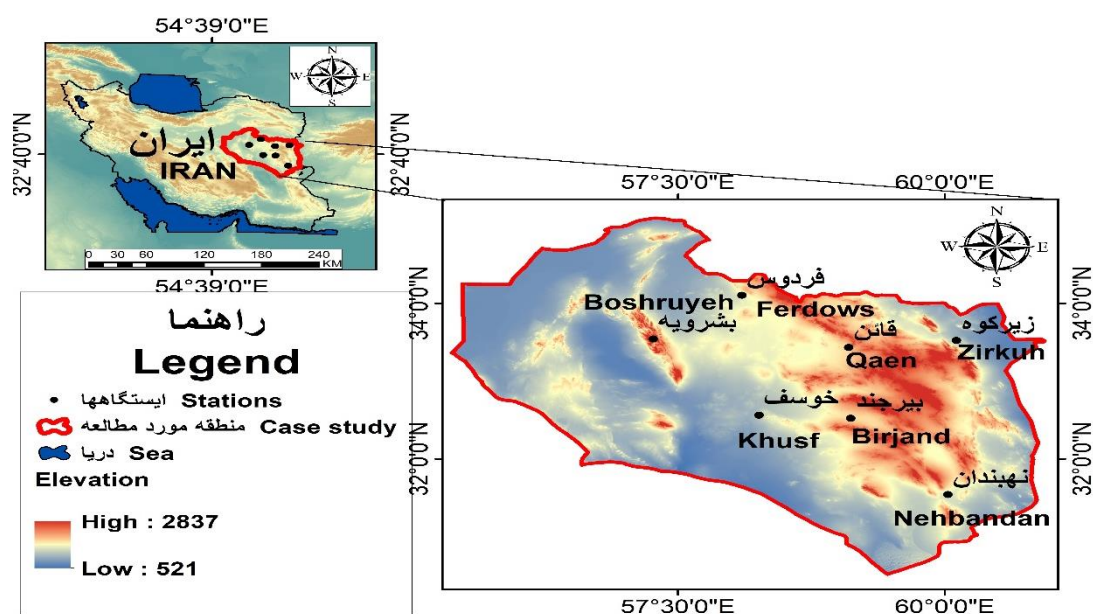
استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان بارش با ضریب ۰/۲۹۸ مهم‌ترین معیار در تعیین مناطق مناسب کشت پسته است. معروفی و همکاران (Maroofi et al., 2024) در مطالعه‌ای به پهنه‌بندی بوم‌شناختی و تعیین الگوی فضایی کشت محصولات زراعی و باغی در منطقه ۳ آمایش کشور پرداختند. این منطقه از نظر شاخص‌های بوم‌شناختی بسیار متنوع بوده و پهنه‌های مختلفی از جمله مناطق مناسب برای تغییر الگوی کشت، توسعه باغات گرمسیری، و توسعه اگروتوریسم را شامل می‌شود. با توجه به پیشینه تحقیق مشخص می‌شود که تمامی پژوهش‌های قبلی به‌نوعی به بررسی محدوده کشت محصول پرداختند و تنش‌های زایشی و رویشی محصول در دماها و بارش‌های مختلف در طول فصل‌های سال مورد توجه قرار نگرفته است که پارامتری بسیار مهم در کیفیت و کمیت محصول محسوب می‌گردد. بنابراین هدف پژوهش حاضر این است که ضمن شناسایی آستانه‌های زایشی و رویشی محصول عنب در طول فصول سال در شهرستان‌های سطح استان خراسان جنوبی، آن را از نظر دما و بارش تحت تأثیر تغییرات روند دمایی و بارشی مورد پهنه‌بندی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان جنوبی با مساحتی بالغ بر ۱۵۱۱۹۳ کیلومتر مربع به‌عنوان سومین استان پهناور، در شرق کشور و بین مدارهای ۵۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته واقع شده است (شکل ۱). این استان از شرق با افغانستان، از شمال با خراسان رضوی، از غرب با استان‌های یزد و کرمان و از جنوب با سیستان و بلوچستان همسایه است. از نظر توپوگرافی، تنوع ارتفاعی قابل‌توجهی در این استان مشاهده می‌شود که از مناطق پست و دشت‌های خشک مانند دشت لوت تا ارتفاعات مهمی همچون رشته‌کوه‌های باقران و قائن (با ارتفاع بیش از ۲۸۰۰ متر) گسترده شده است. این تنوع ارتفاعی سبب ایجاد تفاوت‌های اقلیمی محلی شده، به‌طوری‌که در نواحی پست و جنوبی، اقلیم خشک و گرم بیابانی حاکم است، درحالی‌که مناطق مرتفع‌تر شمالی و مرکزی از اقلیم خشک و معتدل‌تر برخوردارند. میانگین بارش سالانه در این استان بین ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و دمای آن در برخی مناطق به‌ویژه در تابستان‌ها به بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این شرایط جغرافیایی و اقلیمی، استان خراسان جنوبی را به منطقه‌ای حساس در برابر تغییرات آب‌وهوایی تبدیل کرده و تأثیر مستقیمی بر الگوی کشت محصولات باغی از جمله عنب دارد (Khosravei & Akbari, 2009).

دارویی (Shen et al., 2009; Cheng et al., 2000; Sabzghabae et al., 2013)، به‌دلیل سازگاری نسبی با شرایط خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، در معرض تأثیرپذیری از این تغییرات قرار دارد (Waqas et al., 2024; Zittis et al., 2022; Ghasemnejad, Khoshbakht, Mahmoudi, & Sayahnia, 2024). از آنجایی که کشت این درخت از دیرباز در استان خراسان جنوبی رواج داشته و امروزه بیش از ۷۲ درصد تولید عنب ایران در این استان متمرکز است (Rad, Asareh, Vazifeshenas, Kavand, & Soltani Gerdeframarzi, 2020). شناسایی روند تغییر اقلیم و تحلیل اثرات آن بر آستانه‌های زایشی و رویشی عنب از جنبه‌های علمی و کاربردی حائز اهمیت بوده و به درک بهتر الگوهای تغییر اقلیم در منطقه و پیش‌بینی اثرات آن بر کشاورزی کمک کند. بر اساس پیش‌بینی‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ایران در یک قرن آینده با افزایش دمای ۴ درجه سلسیوس مواجه خواهد شد. این تغییرات دمایی همراه با کاهش نزولات جوی و افزایش میزان تبخیر-تعرق، پیامدهای نامطلوبی را برای بخش کشاورزی به همراه خواهد داشت (Hoseini, Nazari, & Araghejad, 2013). این شرایط منجر به تغییر در الگوهای بارش و دما، جابه‌جایی زمان کاشت و برداشت محصولات، و کاهش بهره‌وری کشاورزی خواهد شد (Bouteska, Sharif, Bhuiyan, & Abedin, 2024). چنین تغییراتی نه‌تنها بر عملکرد و تولید محصولات کشاورزی تأثیر منفی می‌گذارند، بلکه امنیت غذایی و معیشت کشاورزان را نیز با مخاطره مواجه می‌کنند. همچنین، تغییر اقلیم بلندمدت بر بازارهای داخلی محصولات کشاورزی و توزیع درآمد بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تأثیرگذار خواهند بود (Saleem et al., 2024). این در حالی است که پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش ۷۰ درصدی تقاضا برای غلات تا سال ۲۰۵۰ است، که این رقم در کشورهای کمتر توسعه‌یافته به دو برابر خواهد رسید (Hunter, Smith, Schipanski, Atwood, & Mortensen, 2017). بنابراین، ضروری است که سیاست‌ها و برنامه‌های پژوهشی در سطح ملی و جهانی، تمرکز بیشتری بر بخش کشاورزی داشته باشند تا از پیامدهای منفی تغییر اقلیم جلوگیری شود (Chang, 2003). اگرچه تحقیقات گسترده‌ای در مورد خواص دارویی عنب انجام شده، اما مطالعات محدودی در زمینه تعیین محدوده‌های مناسب کشت این محصول صورت گرفته است. در این راستا، اشرفی و همکاران (Ashrafi, Mikaniki, & Dehghani, 2013) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به پهنه‌بندی مناطق مستعد کشت عنب در خراسان جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد که حدود ۲۰ درصد از مساحت این استان (۹۴۱۱۲ کیلومتر مربع) برای کشت عنب مناسب یا بسیار مناسب است. میرزاده و همکاران (Mirzadeh, Faizizadeh, Amiri, & Dehghani, 2023) در استان آذربایجان شرقی، امکان‌سنجی کشت پسته را با



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Study area

به دلیل تأییدپذیری کم از مقادیر فرین که ممکن است در برخی سری‌های زمانی مشاهده شوند، مورد توجه قرار گرفته است (Xue et al., 2023). از آنجایی که در پژوهش حاضر از من-کندال تصحیح شده استفاده می‌گردد لذا برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد من-کندال به منابع مربوطه (Bambang, Saravanan, Reddy, Kendall, 1975; Mann, 1945& Abijith, 2023) مراجعه گردد.

آزمون من-کندال تصحیح شده

داده‌های سری زمانی اغلب تحت تأثیر همبستگی سریالی (به عنوان خودهمبستگی نیز شناخته می‌شود) قرار دارند. هنگامی که داده‌ها تصادفی نباشند و تحت تأثیر خودهمبستگی باشند، از آزمون‌های اصلاح شده من-کندال برای تشخیص روند استفاده کرد. حامد و رائو (Hamed & Rao, 1998) روش اصلاح واریانس را برای حل مشکل همبستگی سریالی در تحلیل روند پیشنهاد کرده‌اند. در این روش، ابتدا روند داده‌ها حذف شده و سپس حجم نمونه مؤثر با استفاده از رتبه‌های ضرایب همبستگی سریالی معنی‌دار محاسبه می‌گردد که در نهایت برای اصلاح واریانس افزایش یافته (یا کاهش یافته) آماره آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطه ۱).

$$Var(S)^* = Var(S) \frac{n}{n^*} \quad (1)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)r_i \quad (2)$$

که در آن r_i ضریب خودهمبستگی با تأخیر i می‌باشد (Rao, Hamed, & Chen, 2003).

داده‌ها و روش کار

در این پژوهش، برای تحلیل روند داده‌های مرتبط با تعیین محدوده کشت گیاه عناب، از آزمون‌های من-کندال تصحیح شده، تخمین گر شیب سن و روش رگرسیون خطی استفاده شد. داده‌های مورد بررسی شامل میانگین ماهانه دما و بارش ۷ ایستگاه همدید (بیرجند، قاین، بشرویه، زیرکوه، خوسف، فردوس و نه‌بندان) به همراه داده‌های تأثیرگذار در رشد و نمو گیاه عناب (ساعات آفتابی و روزهای داغ) در منطقه مورد مطالعه بود که دوره آماری ۲۵ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ میلادی را پوشش می‌داد. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کل کشور استخراج شده و مورد مطالعه قرار گرفتند. داده‌های ایستگاهی با استفاده از آزمون من-کندال تصحیح شده در نرم‌افزار Rstudio به نمره z تبدیل شدند. علاوه بر این، روند خطی متغیرهایی همچون دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین دما، بارش، ساعات آفتابی و روزهای داغ به همراه شیب خط مربوطه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای تهیه نقشه پراکنش فضایی دما و بارش از نرم‌افزار ARCGIS استفاده گردید.

آزمون من-کندال

آزمون من-کندال نخستین بار توسط Mann در سال ۱۹۴۵ معرفی شد و پس از آن توسط Kendall در سال ۱۹۷۵ گسترش و بهبود یافت (Serrano, Mateos, & Garcia, 1999). از جمله مزایای اصلی این روش، قابلیت استفاده آن برای سری‌های زمانی است که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند. همچنین، این روش

تخمین‌گر شیب سن

روند اندازه‌گیری شده با استفاده از تخمین‌گر سن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Sen, 1968). این رویکرد، مشابه روش من-کندال تصحیح‌شده، بر پایه مفهوم تفاوت‌های بین مشاهدات در یک سری زمانی استوار است. در این روش، شیب بین هر جفت از نقاط داده در سری زمانی محاسبه شده و سپس میانگین شیب‌های محاسبه‌شده استخراج می‌شود. در نهایت، با استفاده از روابطی که در ادامه ارائه می‌شوند، در مورد معناداری شیب نهایی قضاوت صورت می‌گیرد (برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه به این منبع (Sen, 1968) مراجعه گردد).

روش رگرسیون خطی

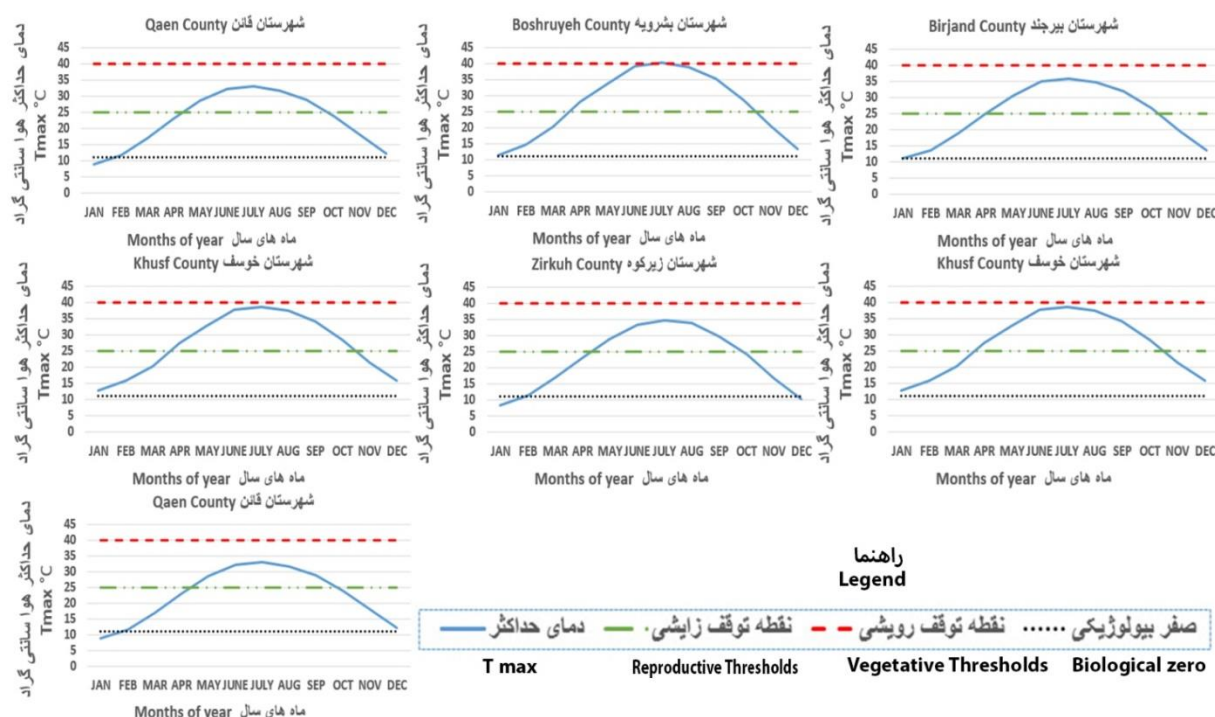
برای تحلیل و شناسایی روند در سری‌های زمانی، از آزمون‌های من-کندال تصحیح‌شده، تخمین‌گر شیب سن و رگرسیون خطی استفاده شده است. پارامترهای آماری حاصل از رگرسیون خطی، تغییرات زمانی میانگین شیب را در متغیرهای مورد مطالعه نشان می‌دهند. مقادیر مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی بیانگر روند کاهشی هستند (Tabari & Marofi, 2010). کل تغییرات در دوره مورد مطالعه با ضرب شیب در تعداد سال‌ها محاسبه شده است. همچنین، در این پژوهش برای بررسی معناداری روند در سطح ۰/۰۵، از P-value استفاده شد که نشان‌دهنده معنی‌داری آماری همبستگی است.

نتایج و بحث

بررسی آستانه دمایی رویشی و زایشی گیاه عناب در دوره پایه

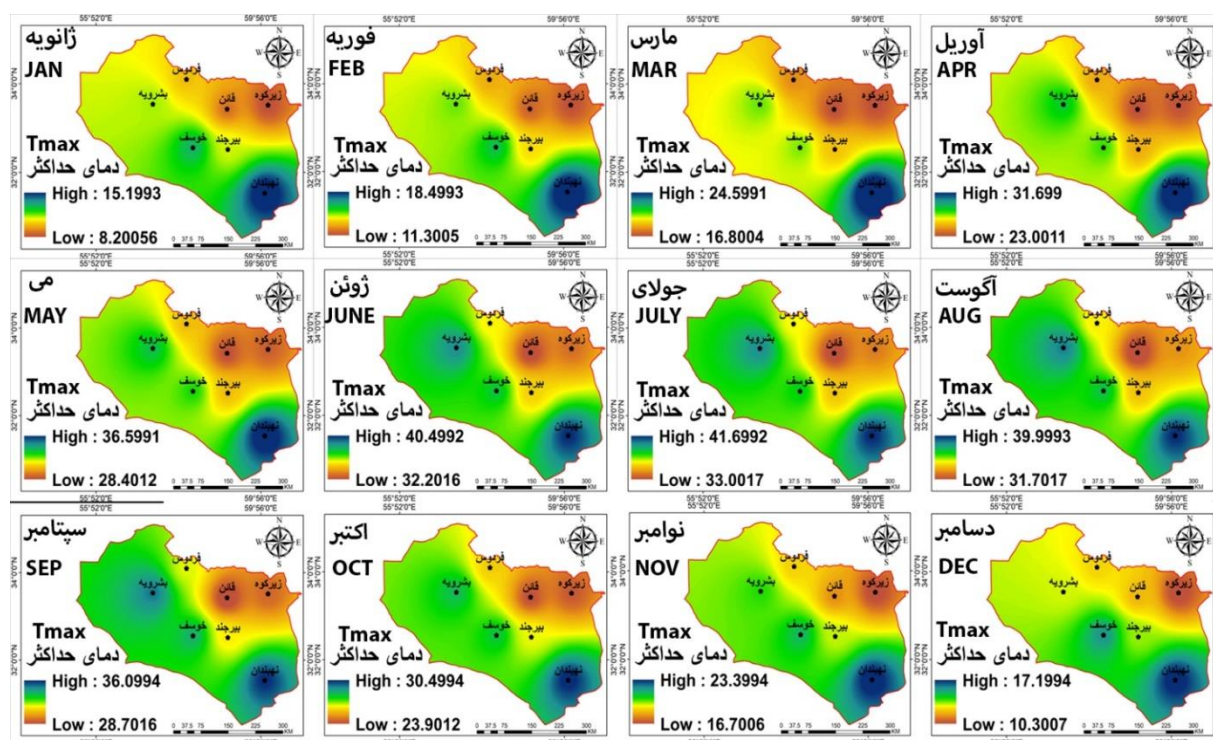
گیاه عناب، مانند سایر گونه‌های گیاهی، برای رشد بهینه خود نیازمند محدوده‌های دمایی مشخصی در مراحل مختلف رشد رویشی و زایشی است (لازم به ذکر است در این پژوهش منظور از آستانه دمایی توقف رویشی: عبارت است از حداکثر دمایی که گیاه برای رشد و توسعه اندام‌های رویشی (مانند برگ و ساقه) می‌تواند تحمل کند؛ و آستانه دمایی توقف زایشی: عبارت است از حداکثر دمایی که در آن فرآیندهای زایشی (مانند گلدهی و تشکیل میوه) در گیاه متوقف می‌شود). در این پژوهش، آستانه‌های دمایی مؤثر بر رشد عناب بر اساس پژوهش‌های قبلی انجام یافته مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲) و مشخص شد که دمای ۲۵ درجه سلسیوس به‌عنوان نقطه توقف رشد زایشی و دمای ۴۰ درجه سلسیوس به‌عنوان نقطه توقف رشد رویشی این گیاه در نظر گرفته می‌شود (Yang, Jin, Fan, Hao, & Niu, 2021; Hao, Yang, Fan, Zeng, & Jin, 2021). علاوه بر

این، صفر بیولوژیکی رشد عناب ۱۱ درجه سلسیوس تعیین شده است و این گیاه توانایی تحمل دماهای پایین تا منفی ۳۳ درجه سلسیوس را دارد (Wang et al., 2022). برخی مطالعات حتی تحمل دماهای تا منفی ۴۰ درجه سلسیوس را نیز برای این گیاه گزارش کرده‌اند (Hao et al., 2021). در این تحقیق، هر یک از ۷ ایستگاه مورد مطالعه در منطقه به‌صورت جداگانه از نظر دماهای حداکثر و نقاط بحرانی که منجر به توقف رشد زایشی و رویشی می‌شوند، تحلیل شدند (شکل ۲). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی خراسان جنوبی به‌طور کلی برای رشد رویشی گیاه عناب در طول سال مناسب است، به‌جز در ایستگاه‌های نهبندان (در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست) و بشرویه (در ماه جولای) که به‌دلیل دمای بسیار بالا، کمبود رطوبت و تنش گرمایی، رشد رویشی متوقف می‌شود (شکل ۲). این محدودیت‌ها منطبق با ویژگی‌های اقلیمی مناطق گرم و خشک است که در اوج تابستان با استرس آبی و حرارتی مواجه می‌شوند. از سوی دیگر، توقف رشد زایشی در تمام ایستگاه‌ها از اواخر مارس تا اوایل نوامبر نشان‌دهنده آن است که فنولوژی زایشی عناب بیشتر تحت تأثیر طول روز و دما قرار دارد و به‌دلیل نیاز سرمایی (Chilling Requirement) و محدودیت‌های فیزیولوژیک، تنها در ماه‌های سرد سال (نوامبر تا مارس) امکان گل‌دهی و میوه‌دهی وجود دارد. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت آبیاری و انتخاب ارقام مقاوم به گرما در کشت عناب در مناطق گرمسیری مانند خراسان جنوبی تأکید می‌کند. برای تحلیل دقیق‌تر توزیع فضایی دماهای حداکثر در منطقه، نقشه‌های پراکنش دمای حداکثر به‌صورت ماهانه و سالانه ترسیم شد (شکل‌های ۳ و ۴). تحلیل نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توزیع فضایی دماهای حداکثر در خراسان جنوبی تحت تأثیر عوامل جغرافیایی-اقلیمی کلیدی قرار دارد: بالاترین دماها در جنوب شرقی استان (نهبندان) منطبق بر ویژگی‌های مناطق پست کویری با تابش مستقیم خورشید، کاهش ابرناکی و تأثیر منطقه پرفشار جنب حاره است، درحالی‌که مناطق مرکزی، شمالی و شمال شرقی به دلیل ارتفاع بالاتر، تعدیل دمایی ناشی از توده‌های کوهستانی (مانند رشته‌کوه قاین) و همچنین رطوبت نسبی مناسب‌تر، شرایط بهینه‌تری برای کشت عناب دارند. این گیاه با نیاز آبی متوسط و تحمل به گرمای خشک، در مناطق با دمای حداکثر متعادل‌تر و اختلاف شبانه‌روزی بالاتر (ویژگی مناطق مرکزی استان) عملکرد بهتری نشان می‌دهد. بنابراین، یافته‌ها از تأثیر هم‌زمان ارتفاع، موقعیت جغرافیایی و الگوهای گردش جوی بر پراکنش دمایی و انتخاب نقاط مستعد کشت حکایت دارد. این نتایج با یافته‌های پژوهش اشرفی و همکاران (Ashrafi et al., 2013) که با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به بررسی توان اکولوژیک و پهنه‌بندی کشت عناب در خراسان جنوبی پرداختند، همخوانی دارد.



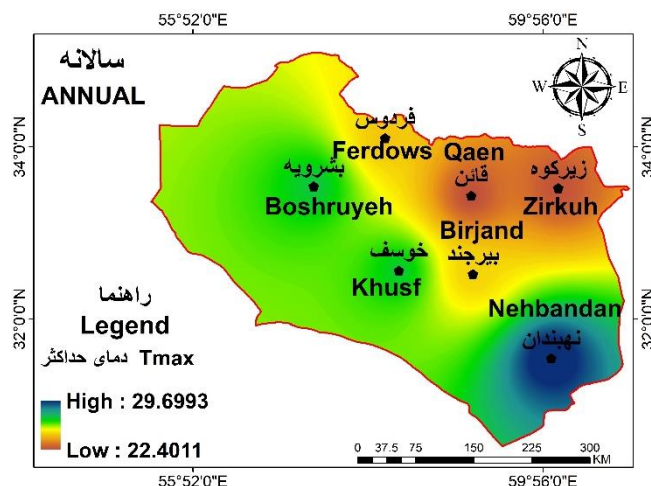
شکل ۲- نمودار آستانه‌هایی دمایی توقف رشد رویشی و زایشی گیاه عناب در منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Diagram of temperature thresholds for stopping vegetative and reproductive growth of jujube plants in the study area



شکل ۳- پراکنش دمای بیشینه در منطقه مورد مطالعه بر اساس آمار دوره پایه در ماه‌های سال

Figure 3- Distribution of maximum temperatures in the study area based on base period statistics for the months of the year



شکل ۴- پراکنش دمای بیشینه سالانه در منطقه مورد مطالعه بر اساس آمار دوره پایه

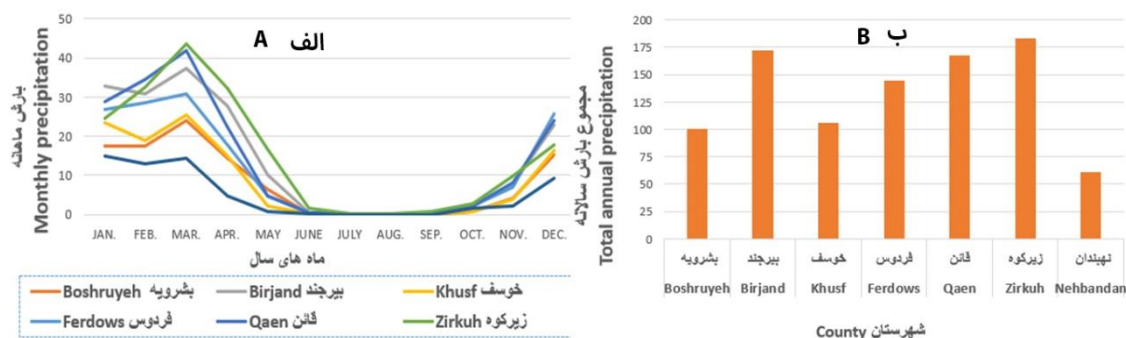
Figure 4- Distribution of annual maximum temperature in the study area based on base period statistics

است (شکل ۵ ب). همچنین، باید توجه داشت که بارش در فصل تابستان می‌تواند برای درخت عنب مخرب باشد، زیرا موجب ترک‌خوردگی میوه‌های آن می‌شود. از آنجاکه در تابستان بارش قابل توجهی در منطقه رخ نمی‌دهد یا بسیار ناچیز است (شکل ۵ الف)، این منطقه به‌عنوان محیطی ایده‌آل برای کشت عنب در نظر گرفته می‌شود.

تحلیل روند

به‌منظور بررسی روند افزایشی یا کاهشی پارامترهای اقلیمی مؤثر بر رشد عنب در دوره پایه در منطقه مورد مطالعه، از روش‌های آماری مختلفی شامل آزمون من-کندال تصحیح‌شده (با استفاده از آماره Z)، تخمین گر شیب سن (Qmed)، شیب رگرسیون خطی (b) و P-value استفاده شد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها برای هر یک از پارامترهای اقلیمی به تفکیک محاسبه و در جداول مجزا ارائه گردید.

بررسی همه‌ی ابعاد مرتبط با رشد گیاه عنب نشان می‌دهد که آستانه‌های رویشی و زایشی این گیاه از نظر حداکثر دمای فصل تابستان در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، فراتر از مقادیر ثبت‌شده در دوره پایه بر اساس داده‌های هواشناسی قرار دارد. در ادامه، میزان بارش مطلوب برای رشد مناسب عنب در منطقه نیز مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۳). بر اساس مطالعات پیشین، مقدار بارش مورد نیاز برای رشد مطلوب عنب در طول دوره رشد آن (از زمان کاشت در اوایل اسفند تا برداشت در اواخر شهریور) حدود ۴۵۰ میلی‌متر برآورد شده است (Song & Bai, 2015). با این حال، در برخی مناطق، این گیاه حتی با بارندگی حدود ۲۰۰ میلی‌متر و به‌صورت دیم نیز قادر به رشد است (Ghous & Haderbadi, Ashrafi et al., 2013). با تحلیل داده‌های بارش سالانه ایستگاه‌های منطقه، مشخص شد که بیشترین میزان بارش مربوط به ایستگاه زیرکوه با مقدار ۱۸۲/۸ میلی‌متر در سال است. این میزان بارش نشان می‌دهد که برای دستیابی به رشد بهینه عنب، استفاده از آبیاری تکمیلی ضروری



شکل ۵- میزان بارش ماهانه (الف) و سالانه (ب) در منطقه مورد مطالعه

Figure 5- Monthly (a) and annual (b) precipitation in the study area

بررسی روند تغییرات دماهای کمینه و بیشینه

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از آزمون من-کندال تصحیح‌شده، مقادیر Z مربوط به دمای کمینه در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ روندی افزایشی را نشان می‌دهند (جدول ۱). بیشترین میزان افزایش در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۶۲ و کمترین افزایش در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۹۸ مشاهده شده است. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از عوامل جغرافیایی همچون ارتفاع، فاصله از منابع رطوبتی و تأثیرات محلی خاص هر منطقه است. این نتایج با یافته‌های بارانی و کرمی (Barani & Karami, 2019) که افزایش دمای کمینه را در منطقه خراسان گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده گسترده‌ی این پدیده در سطح منطقه است. همچنین، تحلیل شیب سن نشان می‌دهد که بیشترین شیب مثبت خط روند مربوط به ایستگاه فردوس با مقدار ۰/۲۷ و کمترین شیب مثبت متعلق به ایستگاه بیرجند با مقدار ۰/۰۹ است. بر اساس شیب رگرسیون خطی، نرخ افزایش سالانه دمای کمینه در بازه‌ای بین ۰/۴۸+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه زیرکوه تا ۱/۵۱+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه فردوس متغیر است. تحلیل مقادیر P-value برای دمای کمینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تغییرات فضایی معناداری است. بر اساس نتایج، ایستگاه‌های شمالی و مرکزی استان (بیرجند و قاین با $p=0/08$ و $p=0/11$ ، خوسف با $p=0/06$) فاقد روند معناداری آماری در دمای کمینه می‌باشند، درحالی‌که این روند در ایستگاه‌های جنوبی‌تر (بشرویه $p=0/02$ ، زیرکوه $p=0/03$) با سطح معناداری کمتری همراه است. ایستگاه فردوس ($p=0/05$) در مرز معناداری قرار

دارد و تنها ایستگاه نهبندان ($p=0/01$) دارای افزایش معناداری آماری قوی بوده که نشان‌دهنده افزایش اثر پرفشار جنب‌حاره‌ای و تفاوت‌های ارتفاعی و توپوگرافی در استان است. نتایج نشان‌دهنده این است که منطقه از نظر دمایی تحت تأثیر عواملی همچون اختلاف ارتفاع، موقعیت توپوگرافی و تأثیر سیستم‌های جوی منطقه‌ای است که منجر به تغییرپذیری فضایی در روندهای دمایی شده است. در مورد دمای بیشینه نیز نتایج آزمون من-کندال تصحیح‌شده حاکی از روند افزایشی در تمامی ایستگاه‌ها طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ است (جدول ۱). بیشترین افزایش در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۶۶ و کمترین افزایش در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۱/۱۳ ثبت شده است. تحلیل شیب سن نشان می‌دهد که بیشترین شیب مثبت خط روند مربوط به ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۲۰ و کمترین شیب مثبت متعلق به ایستگاه قائن با مقدار ۰/۰۸ است. بر اساس شیب رگرسیون خطی، نرخ افزایش سالانه دمای بیشینه در محدوده‌ای بین ۰/۴۷+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه زیرکوه تا ۱/۷۵+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه خوسف متغیر است. تحلیل مقادیر P-value برای دمای بیشینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده تغییرات فضایی معناداری است، به‌طوری‌که ایستگاه‌های بیرجند، خوسف و قاین ($p \leq 0/05$) در شمال و مرکز استان، فاقد روند معناداری آماری بوده است، درحالی‌که ایستگاه‌های جنوبی‌تر مانند نهبندان ($p=0/04$) دارای روند قوی معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که گرمایش در مناطق شمالی و مرکزی خراسان جنوبی با اطمینان آماری بالاتری رخ داده است (جدول ۱).

جدول ۱- بررسی روند دماهای کمینه و بیشینه در بازه‌ی آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۴

Table 1- Review of the trend of minimum and maximum temperatures in the statistical period 2000-2024

ایستگاه‌ها Stations	دمای کمینه Minimum temperature (°C)				ایستگاه‌ها Stations	دمای بیشینه Maximum temperature (°C)			
	(Z)	(Qmed)	(b)	(p)		(Z)	(Qmed)	(b)	(p)
بیرجند Birjand	1.11	0.09	0.82	0.08	بیرجند Birjand	1.93	0.13	1.57	0.12
قاین Qaen	2.47	0.14	0.75	0.11	قاین Qaen	1.36	0.08	1.15	0.06
بشرویه Boshruyeh	3.31	0.11	1.14	0.02	بشرویه Boshruyeh	3.07	0.15	0.86	0.08
زیرکوه Zirkuh	0.98	0.17	0.48	0.03	زیرکوه Zirkuh	1.13	0.20	0.47	0.03
خوسف Khusf	2.75	0.24	0.66	0.06	خوسف Khusf	2.45	0.18	1.75	0.11
فردوس Ferdows	3.44	0.27	1.51	0.05	فردوس Ferdows	1.98	0.09	0.69	0.05
نهبندان Nehbandan	3.62	0.19	0.64	0.01	نهبندان Nehbandan	3.66	0.16	1.23	0.04

بررسی روند تغییرات میانگین دما و بارش

بررسی روند تغییرات دما و بارش در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده الگوهای متفاوتی است. بر اساس آزمون من-کندال تصحیح‌شده، میانگین دما در تمامی ایستگاه‌ها روندی افزایشی داشته است (جدول ۲). بیشترین میزان افزایش دما در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۴۳ و کمترین آن در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۹۴ مشاهده شده است. این تفاوت در مقادیر افزایشی دما را می‌توان به عواملی همچون موقعیت جغرافیایی، ارتفاع، فاصله از منابع رطوبتی و شرایط محلی هر منطقه نسبت داد. نتایج حاصل از تخمین گر شیب سن نیز نشان می‌دهد که بیشترین شیب مثبت خط روند دما مربوط به ایستگاه فردوس با مقدار ۰/۲۴ و کمترین شیب مثبت متعلق به ایستگاه خوسف با مقدار ۰/۰۳ است. بر اساس تحلیل رگرسیون خطی، میزان افزایش سالانه دما در محدوده‌ای بین ۰/۰۷+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه‌های بیرجند و زیرکوه تا ۲/۴۸+ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه نهبندان متغیر است. علاوه بر این، تحلیل مقادیر P-value برای میانگین دما نشان‌دهنده تغییرات فضایی معناداری است، به‌طوری‌که ایستگاه‌های بیرجند، بشرویه و قاین ($p \leq 0/05$) در شمال و مرکز استان، فاقد روند معناداری آماری بوده است، درحالی‌که ایستگاه‌های جنوبی‌تر مانند نهبندان ($p = 0/02$) دارای روند قوی معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد. در مورد روند بارش، نتایج آزمون من-کندال تصحیح‌شده (مقادیر Z) حاکی از کاهش بارش در تمامی ایستگاه‌ها طی دوره مورد بررسی است (جدول ۲). بیشترین کاهش بارش در ایستگاه نهبندان با مقدار ۳/۳۲- و کمترین کاهش در

ایستگاه بیرجند با مقدار ۰/۶۳- ثبت شده است. تحلیل شیب سن نیز نشان می‌دهد که بیشترین شیب منفی خط روند بارش مربوط به ایستگاه فردوس با مقدار ۰/۳۴- و کمترین شیب منفی متعلق به ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۱۳- است. بر اساس داده‌های رگرسیون خطی، میزان کاهش سالانه بارش در محدوده‌ای بین ۰/۰۴- میلی‌متر در هر دهه برای ایستگاه زیرکوه تا ۱/۸۰- میلی‌متر در هر دهه برای ایستگاه قائن متغیر بوده است. تحلیل مقادیر P-value برای میانگین بارش نشان‌دهنده تغییرات فضایی معناداری است، به‌طوری‌که ایستگاه‌های بیرجند، بشرویه و زیرکوه و قاین ($p \leq 0/05$) در شمال و مرکز استان، روند قوی معناداری آماری بوده است، درحالی‌که ایستگاه‌های جنوبی‌تر مانند نهبندان ($p = 0/28$) فاقد روند معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد (جدول ۲).

بررسی روند تغییرات ساعات آفتابی و روزهای داغ

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مقادیر Z آزمون من-کندال تصحیح‌شده برای ساعات آفتابی و روزهای داغ در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ روندی صعودی را نشان می‌دهد. در مورد ساعات آفتابی، بیشترین افزایش در ایستگاه نهبندان با مقدار ۰/۹۷ و کمترین افزایش در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۱۷ مشاهده شده است. بر اساس تحلیل شیب سن، بیشترین شیب مثبت خط روند ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه نهبندان با مقدار ۰/۴۹ و کمترین شیب مثبت مربوط به ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۰۳ است.

جدول ۲- بررسی روند پارامترهای میانگین دما و بارش در بازه‌ی آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۴

Table 2- Review of the trend of average temperature and precipitation parameters in the statistical period 2000-2024

ایستگاه‌ها Stations	میانگین دما Average temperature (°C)				ایستگاه‌ها Stations	بارش Precipitation (mm)			
	(Z)	(Qmed)	(b)	(p)		(Z)	(Qmed)	(b)	(p)
بیرجند Birjand	2.17	0.17	0.07	0.08	بیرجند Birjand	-0.63	0.27	-0.19	0.04
قاین Qaen	1.84	0.11	0.62	0.09	قاین Qaen	-2.44	0.35	-1.80	0.00
بشرویه Boshruyeh	2.61	0.07	0.21	0.07	بشرویه Boshruyeh	-1.87	0.51	-0.35	0.05
زیرکوه Zirkuh	0.94	0.05	0.07	0.01	زیرکوه Zirkuh	-0.98	-0.13	-0.04	0.01
خوسف Khusf	3.15	0.03	1.17	0.00	خوسف Khusf	-2.76	-0.23	-0.56	0.08
فردوس Ferdows	2.01	0.34	1.34	0.03	فردوس Ferdows	-2.12	-0.34	-0.36	0.12
نهبندان Nehbandan	3.43	0.22	2.48	0.02	نهبندان Nehbandan	-3.32	0.28	-0.17	0.28

همچنین، نتایج حاصل از شیب رگرسیون خطی نشان می‌دهد که میزان افزایش سالانه ساعات آفتابی در محدوده‌ای بین ۰/۰۴ دقیقه در هر دهه برای ایستگاه زیرکوه تا ۱/۷۸ دقیقه در هر دهه برای ایستگاه نه‌بندان متغیر بوده است. در خصوص روزهای داغ، که به‌عنوان شاخصی مهم در اقلیم کشاورزی برای ارزیابی درجه روزهای مؤثر بر رشد گیاهان شناخته می‌شوند، بیشترین افزایش در ایستگاه نه‌بندان با مقدار ۳/۳۸ و کمترین افزایش در ایستگاه زیرکوه با مقدار ۰/۲۷ ثبت شده است. تحلیل شیب سن برای روزهای داغ نیز حاکی از آن است که بیشترین شیب مثبت خط روند متعلق به ایستگاه نه‌بندان با مقدار ۰/۲۱ و کمترین شیب مثبت مربوط به ایستگاه فردوس با مقدار ۰/۰۲ است. بر اساس یافته‌های شیب رگرسیون خطی، میزان افزایش سالانه دمای کمینه در محدوده‌ای بین ۰/۸۹ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه نه‌بندان تا ۲/۶۷ درجه سلسیوس در هر دهه برای ایستگاه نه‌بندان متغیر بوده است. در نهایت، تحلیل مقادیر P-value برای ساعات آفتابی و روزهای داغ نشان‌دهنده این است که ایستگاه‌های نه‌بندان و خوسف ($p \leq 0.05$) در جنوب و مرکز استان، روند قوی معناداری آماری بوده است، درحالی‌که ایستگاه‌های شمالی-تر مانند بیرجند، قائن و بشرویه ($p > 0.05$) فاقد روند معناداری آماری در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد (جدول ۳).

روند تغییرات پارامترهای تأثیرگذار در رشد گیاه عناب

جدول ۳- بررسی روند پارامترهای ساعات آفتابی و روزهای داغ در بازه‌ی آماری ۲۰۰۰-۲۰۲۴

Table 3- Review of the trend of sunny hours and hot days parameters in the statistical period 2000-2024

ایستگاه‌ها Stations	ساعات آفتابی Sunshine hours (hour)				ایستگاه‌ها Stations	روزهای داغ Hot days (day)			
	(Z)	(Qmed)	(b)	(p)		(Z)	(Qmed)	(b)	(p)
بیرجند Birjand	0.44	0.41	0.17	0.19	بیرجند Birjand	1.51	0.19	1.05	0.09
قاین Qaen	0.29	0.22	0.33	0.07	قاین Qaen	1.74	0.09	0.91	0.08
بشرویه Boshruyeh	0.67	0.34	0.85	0.15	بشرویه Boshruyeh	2.92	0.07	1.39	0.11
زیرکوه Zirkuh	0.17	0.03	0.04	0.09	زیرکوه Zirkuh	0.27	0.12	0.89	0.01
خوسف Khusf	0.83	0.21	0.97	0.01	خوسف Khusf	1.88	0.08	2.21	0.00
فردوس Ferdows	0.74	0.07	0.54	0.11	فردوس Ferdows	1.13	0.02	1.11	0.15
نه‌بندان Nehbandan	0.97	0.49	1.78	0.03	نه‌بندان Nehbandan	3.38	0.21	2.67	0.04

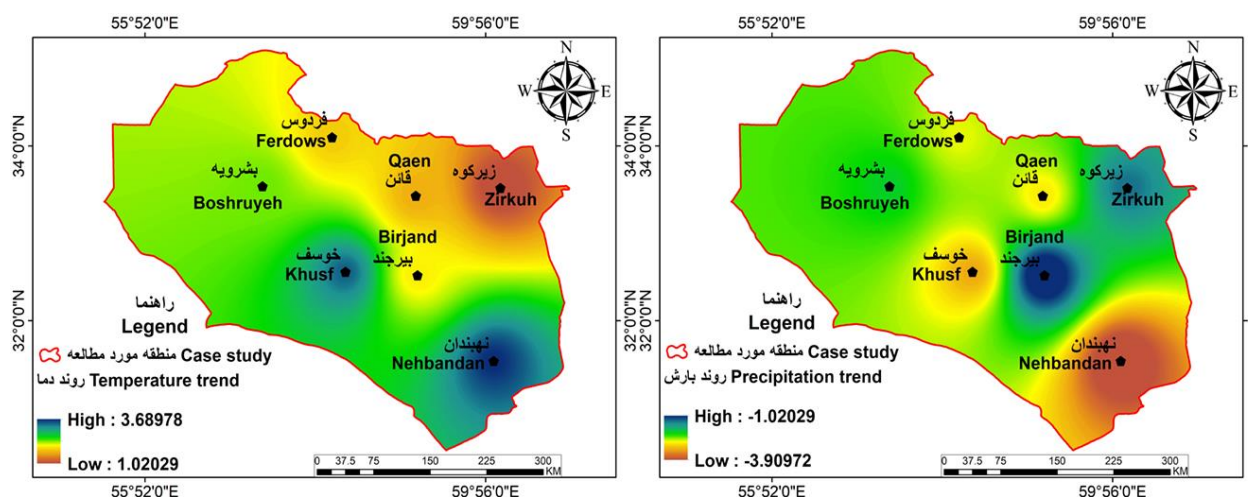
در نهایت، پس از تحلیل جداگانه کلیه پارامترهای اقلیمی با استفاده از مقادیر آماری Z من-کندال تصحیح‌شده، تخمین‌گر شیب سن (Qmed)، شیب رگرسیون خطی (b) و P-value، روند تغییرات پارامترهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاه عناب بر اساس روش من-کندال تصحیح‌شده ارزیابی شد (جدول ۴). همان‌گونه که در جدول ۴ قابل مشاهده است، کلیه ایستگاه‌های مورد مطالعه در مناطق کشت عناب در دوره پایه، برای پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعات آفتابی، روزهای گرم و میانگین دما، روندی افزایشی را نشان می‌دهند. این روند افزایشی در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار بوده است. علاوه بر این، نتایج حاصل از روش من-کندال تصحیح‌شده بیانگر آن است که پارامتر بارش در تمامی ایستگاه‌ها در دوره پایه دارای روندی کاهشی است که این روند نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار به دست آمده است.

نتایج تحلیل روند پارامترهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاه عناب حاکی از آن است که دمای هوا، به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل اقلیمی تأثیرگذار بر رشد این گیاه، در دوره پایه روندی صعودی را تجربه کرده است. این افزایش دما در مناطق کشت عناب نیز به‌وضوح قابل مشاهده است و می‌توان آن را در راستای پدیده گرمایش جهانی تفسیر نمود. از طرف دیگر، بررسی روند بارش نشان‌دهنده کاهش معنادار میزان نزولات جوی است که بیانگر تشدید خشکی و وقوع پدیده خشکسالی در مناطق تحت کشت عناب می‌باشد.

جدول ۴- روند تغییرات پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار در رشد گیاه عناب بر اساس روش من - کندال تصحیح شده

Table 4- Trend of changes in climatic parameters affecting jujube plant growth based on the Modified Mann-Kendall method

ایستگاه Station	دمای کمینه Minimum temperature (°C)	دمای بیشینه Maximum temperature (°C)	میانگین دما Average temperature (°C)	بارش Precipitation (mm)	ساعات آفتابی Sunshine hours (hour)	روزهای داغ Hot days (day)
بیرجند Birjand	1.11	1.93	2.17	-0.63	0.44	1.51
قاین Qaen	2.47	1.36	1.84	-2.24	0.29	1.74
بشروییه Boshruyeh	3.31	3.07	2.61	-1.87	0.67	2.92
زیرکوه Zirkuh	0.98	1.13	0.94	-0.98	0.17	0.27
خوسف Khusf	2.75	2.45	3.15	-2.76	0.83	1.88
فردوس Ferdows	3.44	1.98	2.01	-2.12	0.74	1.13
نهبندان Nehbandan	3.62	3.66	3.43	-3.32	0.97	3.38



شکل ۶- تغییرات مکانی روند دما و بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم

Figure 6 - Spatial Variability Trends of temperature and precipitation under the influence of climate change

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که ایستگاه زیرکوه با میانگین بارش سالانه ۱۸۲/۸ میلی‌متر، بیشترین میزان بارندگی را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی به خود اختصاص داده است. این در حالی است که حتی در این ایستگاه نیز گیاه عناب به آبیاری تکمیلی به میزان ۲۶۷/۲ میلی‌متر نیاز دارد. خوشبختانه شرایط اقلیمی منطقه به‌گونه‌ای است که بارش‌های تابستانه که می‌تواند موجب ترک‌خوردگی میوه شود، در این ناحیه بسیار نادر و کم‌مقدار است که این ویژگی، منطقه را به محیطی ایده‌آل برای کشت عناب تبدیل

در نتیجه، برای مدیریت کارآمد و پایدار این مناطق در آینده، تمرکز بر مدیریت بهینه منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر کاهش بارش، روند صعودی ساعات آفتابی و افزایش تعداد روزهای داغ نیز حاکی از تشدید تابش خورشید، افزایش نرخ تبخیر-تعرق، و تشدید شرایط خشکی محیطی است. این تغییرات نه تنها می‌تواند منجر به گسترش آفات و بیماری‌های گیاهی شود، بلکه فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد کرده و نیاز به افزایش دفعات آبیاری را به همراه خواهد داشت. در ادامه، پراکنش مکانی دما و بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم در مقایسه با دوره پایه مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس این تحلیل، بیشترین تغییرات روندی در بخش جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی شده است (شکل ۶).

دارای روند افزایشی دمای هوای بوده است. بررسی روند بارش نیز بیانگر کاهش بودن روند آن بود که می‌توان آن را نشانه‌ای از کاهش باران در مناطق کشت گیاه عناب در نظر گرفت. همچنین بر اساس بررسی‌های صورت گرفت در مورد آستانه‌های دمایی محصول عناب به‌جز دو ایستگاه‌های نه‌بندان (ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست) و بشرویه (ماه جولای) که از نظر رشد رویشی دچار توقف می‌شود سایر ایستگاه‌ها در هیچ زمانی از نظر حداکثر دما دچار توقف رویشی نمی‌شوند. در مقابل تمامی ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه بدون استثنا از ماه مارس تا ماه اکتبر از نظر رشد زایشی دچار توقف می‌شوند. در ادامه برای درک بهتر توزیع فضایی دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه نقشه پراکنش دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه نیز در ماه‌های مختلف سال و در نهایت به‌صورت سالانه رسم گردید. همچنین بر این اساس نقشه توزیع مکانی دما حداکثر مشخص گردید که بیشینه دمایی منطقه مورد مطالعه بیشتر در جنوب شرقی استان خراسان جنوبی که ایستگاه منتخب نه‌بندان در آن قرار دارد اتفاق افتاده است. همچنین مناطق مرکزی، شمال، و شمال شرق مناطق مستعد از نظر دمایی می‌باشند. این بخش از پژوهش حاضر با پژوهش‌های مذکور (Gholipour, Mousavi Bayegi, Abedini, Mousavi Babaeian, & Jabbari Nooghabi, 2021; Baygi, Khashei Siuki, & Selahvarzi, 2020) که در آن به افزایش بودن روند دمای حداکثر و کاهش بودن بارش استان خراسان جنوبی اذعان شده است، تطابق دارد. بررسی تمامی جوانب نشان می‌دهد که آستانه‌های رویشی و زایشی گیاه عناب از نظر بیشینه دمایی در فصل تابستان در تمامی ایستگاه‌ها بر اساس محاسبات صورت گرفته دارای روند افزایشی می‌باشد لذا برای مدیریت بهتر محدوده کشت عناب در آینده در منطقه مورد مطالعه حتماً باید مدیریت منابع آب را نیز در نظر گرفت. همچنین در کنار کاهش بارش، روند افزایشی ساعات آفتابی و روزهای داغ حاکی از افزایش میزان تابش خورشید و افزایش میزان تبخیر-تعرق و خشکی بیشتر محیط است.

کرده است. تحلیل داده‌های اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده ناهمگونی فضایی قابل‌توجه در روند تغییرات دماست. نتایج آزمون من-کندال اصلاح‌شده بیانگر روند افزایشی دما در تمامی ایستگاه‌ها می‌باشد که بیشترین میزان آن در ایستگاه نه‌بندان با ۳/۴۳ درجه و کمترین آن در ایستگاه زیرکوه با ۰/۹۴ درجه مشاهده شده است. این تغییرات مکانی را می‌توان ناشی از تفاوت‌های ارتفاعی، موقعیت جغرافیایی و شرایط میکروکلیمایی هر منطقه دانست. برآوردهای تخمین‌گر شیب سن نیز مؤید این نتایج است، به‌طوری‌که بیشترین شیب مثبت مربوط به ایستگاه فردوس (۰/۲۴) و کمترین مقدار مربوط به ایستگاه خوسف (۰/۰۳) بوده است. تحلیل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که نرخ افزایش دما در دهه اخیر از ۰/۰۷ درجه در ایستگاه‌های بیرجند و زیرکوه تا ۲/۴۸ درجه در ایستگاه نه‌بندان متغیر بوده است. از منظر آماری، بررسی مقادیر P-value بیانگر الگوی فضایی معناداری در تغییرات دماست. درحالی‌که ایستگاه‌های شمالی و مرکزی مانند بیرجند، بشرویه و قاین ($p \leq 0/05$) روند معناداری نشان نمی‌دهند، ایستگاه‌های جنوبی به‌ویژه نه‌بندان ($p \leq 0/02$) از روند افزایشی معناداری برخوردار هستند. در مورد بارش‌ها، نتایج حاکی از روند کاهشی در تمامی ایستگاه‌هاست. بیشترین کاهش در نه‌بندان (۳/۳۲-) و کمترین کاهش در بیرجند (۰/۶۳-) ثبت شده است. تحلیل شیب سن نیز بیشترین کاهش را برای فردوس (۰/۳۴-) و کمترین کاهش را برای زیرکوه (۰/۱۳-) نشان می‌دهد. بر اساس تحلیل رگرسیون، نرخ کاهش بارش از ۰/۰۴ میلی‌متر در دهه در زیرکوه تا ۱/۸۰ میلی‌متر در دهه در قاین متغیر بوده است. از نظر آماری، ایستگاه‌های شمالی و مرکزی ($p \geq 0/05$) روند کاهشی معناداری را نشان می‌دهند، درحالی‌که این روند در ایستگاه‌های جنوبی مانند نه‌بندان ($p = 0/28$) فاقد معناداری آماری است. جمع‌بندی نتایج حاصل از تحلیل روند پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار در روند رشد گیاه عناب بیانگر این بود که دمای هوا به‌عنوان یکی از مؤثرترین و مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار در روند رشد گیاه عناب، دارای روند افزایشی بوده و در همین راستا نیز مناطق کشت محصول عناب نیز

References

1. Abedini, E., Mousavi Baygi, M., Khashei Siuki, A., & Selahvarzi, Y. (2020). Investigating the trend of extreme climatic events in South Khorasan province. *Journal of Agricultural Meteorology*, 7(2), 55-66. (In Persian with English abstract)
2. Alston, J.M., & Pardey, P.G. (2014). Agriculture in the global economy. *Journal of Economic Perspectives*, 28(1), 121-146. <https://doi.org/10.1257/jep.28.1.121>
3. Ashrafi, A., Mikaniki, J., & Dehghani, M. (2013). Agro-ecological zoning and evaluation of ecological potencies of south Khorasan for Jujube plantation. *Geographical Planning of Space*, 3(7), 67-86. (In Persian with English abstract)
4. Bambang, I., Saravanan, S., Reddy, N.M., & Abijith, D. (2023). An investigation of the changing patterns of rainfall in the Indravathi subbasin utilizing the Mann-Kendall and Sen's slope methods. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1173, No. 1, p. 012036). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012036>
5. Barani, N., & Karami, A. (2019). Annual trend analysis of climate parameters of temperature and precipitation in

- decuple agroecology regions of Iran. *Environmental Sciences*, 17(4), 75-90. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.4.75>
6. Bouteska, A., Sharif, T., Bhuiyan, F., & Abedin, M.Z. (2024). Impacts of the changing climate on agricultural productivity and food security: Evidence from Ethiopia. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141793>
 7. Chang, C.C. (2003). The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agricultural Economics*, 27(1), 51-64. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2002.tb00104.x>
 8. Cheng, G., Bai, Y., Zhao, Y., Tao, J., Liu, Y., Tu, G., & Xu, X. (2000). Flavonoids from *Ziziphus jujuba* Mill var. *spinosa*. *Tetrahedron*, 56(45), 8915-8920. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(00\)00842-5](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(00)00842-5)
 9. Ghasemnejad, A., Khoshbakht, K., Mahmoudi, H., & Sayahnia, R. (2024). Assessing the trends and drivers of agricultural land use change in the Ramsar County, northern Iran. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100410>
 10. Gholipour, J., Mousavi Bayegi, M., Babaeian, I., & Jabbari Nooghabi, M. (2021). Investigating the trend of extreme precipitation events South Khorasan province due to climate change. *Journal of Climate Research*, 1400(46), 29-42. (In Persian with English abstract)
 11. Ghous, K., & Haderbadi, Gh.R. (2013). Production d'épine-vinette, de safran et de jujube basée sur les connaissances autochtones et un aperçu de la culture du jujubier dans d'autres pays, Fakrbakr Publications, Khorasan du Sud, 180 pages. (In Persian with English abstract), <https://doi.org/10.3917/afd.madar.2013.01.0001>
 12. Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
 13. Hao, Q., Yang, L., Fan, D., Zeng, B., & Jin, J. (2021). The transcriptomic response to heat stress of a jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) cultivar is featured with changed expression of long noncoding RNAs. *PLoS One*, 16(5), e0249663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249663>
 14. Hoseini, S.S., Nazari, M., & Araghinejad, S. (2013). Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44(1), 1-16. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2013.36064>
 15. Hunter, M.C., Smith, R.G., Schipanski, M.E., Atwood, L.W., & Mortensen, D.A. (2017). Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. *Bioscience*, 67(4), 386-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
 16. Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, 202 pp.
 17. Khosravei, M., & Akbarei, M. (2009). A study characteristic of Khorasan- South province drought climatology. *Geography and Development*, 7(14), 51-68. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/gdij.2009.1216>
 18. Mann, H.B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
 19. Maroofi, A., Azizpour, F., Omid Shahabadi, O., Hasanpour, S., Enayati, M., & Najafizadeh, Z. (2024). Ecological zoning and determination of cropping and orchard spatial pattern in the region 3 of Iran. *Village and Space Sustainable Development*, 5(1), 1-25. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/vssd.2023.5982.1162>
 20. Mirzadeh, N., Faizizadeh, B., Amiri, H., & Dehghani, V. (2023). Application of GIS and multi-criteria decision making method for investigating the feasibility of Pistachio cultivation (Case study: East Azerbaijan province). *Management of Natural Ecosystems*, 2(4), 38-51. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/emj.2024.714432>
 21. Pawlak, K., & Kołodziejczak, M. (2020). The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production. *Sustainability*, 12(13), 5488. <https://doi.org/10.3390/su12135488>
 22. Rad, M., Asareh, M., Vazifeshenas, M., Kavand, A., & Soltani Gerdeframarzi, M. (2020). Evaluation of different levels of irrigation on evapotranspiration (ET), crop coefficient (Kc) and yield of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) under lysimetry conditions. *Water and Soil*, 34(4), 847-860. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i4.86329>
 23. Rao, A.R., Hamed, K.H., & Chen, H.-L. (2003). Nonstationarities in hydrologic and environmental time series. Ringgold Inc., Portland, Oregon, 362 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0117-5>
 24. Sabzghabae, A.M., Khayam, I., Kelishadi, R., Ghannadi, A., Soltani, R., Badri, S., & Shirani, S. (2013). Effect of *Zizyphus jujuba* fruits on dyslipidemia in obese adolescents: a triple-masked randomized controlled clinical trial. *Medical Archives*, 67(3), 156. <https://doi.org/10.5455/medarh.2013.67.156-160>
 25. Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., & Nawaz, T. (2024). Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00177-3>
 26. Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American*

- Statistical Association, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
27. Serrano, A., Mateos, V.L., & Garcia, J.A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921–1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)
28. Shen, X., Tang, Y., Yang, R., Yu, L., Fang, T., & Duan, J.A. (2009). The protective effect of *Zizyphus jujube* fruit on carbon tetrachloride-induced hepatic injury in mice by anti-oxidative activities. *Journal of Ethnopharmacology*, 122(3), 555-560. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2009.01.027>
29. Song, X.I.A.O.Y.U., & Bai, P.E.N.G. (2015). Research experiment on infiltration and runoff in Jujube land of northern Shaanxi Province. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 174-179. <https://doi.org/10.5194/piahs-368-174-2015>
30. Tabari, H., & Marofi, S. (2011). Changes of pan evaporation in the west of Iran. *Water Resources Management*, 25, 97-111. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9689-6>
31. Wang, Y., Wang, L., Tuerxun, N., Luo, L., Han, C., & Zheng, J. (2022). Extraction of jujube planting areas in sentinel-2 image based on NDVI threshold—A case study of Ruoqiang County. In *2022 29th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Geoinformatics57846.2022.9963828>
32. Waqas, M., Naseem, A., Humphries, U.W., Hlaing, P.T., Shoaib, M., & Hashim, S. (2024). A comprehensive review of the impacts of climate change on agriculture in Thailand. *Farming System*, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100114>
33. Xue, Y., Song, D., Chen, J., Li, Z., He, X., Wang, H., & Sobolev, A. (2023). Integrated rockburst hazard estimation methodology based on spatially smoothed seismicity model and Mann-Kendall trend test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 163, 105329. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105329>
34. Yang, L., Jin, J., Fan, D.Y., Hao, Q., & Niu, J.X. (2021). Transcriptome analysis of a jujube (*Ziziphus Jujuba* Mill.) cultivar response to heat stress. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-147915/v1>
35. Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., & Lelieveld, J. (2022). Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of geophysics*, 60(3), e2021RG000762. <https://doi.org/10.1029/2021RG000762>

Contents

Development of an Integrated Online System for Flood Forecasting and Warning by Integrating Numerical Weather, Hydrological, and Hydraulic Models: A Case Study of the Gorganrood Watershed	219
Z. Alizadeh, M. Shamsavandi, M. Masoudi-Moghaddam, S. Talebi, J. Yazdi	
Spatial Prediction of Gully Erosion Susceptibility in the Talwar Watershed of Kurdistan Province Using Random Forest and Boosted Regression Trees Models and Evaluating their Accuracy	243
O. Rahmati, S.M. Soleimanpour, S. Shadfar, S. Zahedi	
Study of Water Flow and Nitrate Transport under Center Pivot Irrigation Using the HYDRUS-3D Model	259
S. Etminan, V. Jalali	
Evaluation of the Effects of Monopotassium Phosphate and Cow Manure on Phosphorus Dynamics and Soil Chemical Properties	275
A. Barvar, N. Boroomand, M. Hejazi-Mehrizi, M. Sadat Hosseini	
Spatiotemporal Mapping of Soil Organic Carbon Using an Inverse Modeling Approach: A Case Study of the Zayandeh Rud Watershed in Isfahan Province	291
S. Masoumi, H.R. Matinfar, S.R. Mousavi	
Analysis of Temperature and Precipitation Trends and Their Impact on the Reproductive and Vegetative Thresholds and Cultivation Range of Jujube (<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.)	313
M. Asadi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 39

No. 3

Jul.-Agu. 2025

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Tabriz University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).



Vol. 39 No. 3

2025

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

- Development of an Integrated Online System for Flood Forecasting and Warning by Integrating Numerical Weather, Hydrological, and Hydraulic Models: A Case Study of the Gorganrood Watershed 219**
Z. Alizadeh, M. Shahsavandi, M. Masoudi-Moghaddam, S. Talebi, J. Yazdi
- Spatial Prediction of Gully Erosion Susceptibility in the Talwar Watershed of Kurdistan Province Using Random Forest and Boosted Regression Trees Models and Evaluating their Accuracy 243**
O. Rahmati, S.M. Soleimanpour, S. Shadfar, S. Zahedi
- Study of Water Flow and Nitrate Transport under Center Pivot Irrigation Using the HYDRUS-3D Model..... 259**
S. Etminan, V. Jalali
- Evaluation of the Effects of Monopotassium Phosphate and Cow Manure on Phosphorus Dynamics and Soil Chemical Properties 275**
A. Barvar, N. Boroomand, M. Hejazi-Mehrizi, M. Sadat Hosseini
- Spatiotemporal Mapping of Soil Organic Carbon Using an Inverse Modeling Approach: A Case Study of the Zayandeh Rud Watershed in Isfahan Province 291**
S. Masoumi, H.R. Matinfar, S.R. Mousavi
- Analysis of Temperature and Precipitation Trends and Their Impact on the Reproductive and Vegetative Thresholds and Cultivation Range of Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) 313**
M. Asadi