Journal of Society and Environment

The need to use existing local spatial soil data and big data analysis in accurate agricultural decision-making towards sustainable development*

Sedigheh Maleki[1], Jafar Javadi[2]

[1] Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
[2] Soil and Water Management and Technical and Engineering Affairs, Agricultural Jihad Organization of Khorasan Razavi Province, Iran.

10.22080/JSN.2026.30693.1132

Received:
December 3, 2025
Accepted:
March 3, 2026

Keywords:
Sustainable development, Khorasan Razavi, soil data, input consumption

Abstract

Khorasan Razavi Province, as one of the most important agricultural hubs in the country, plays a key role in Iran's food security and production of strategic products. Climate change, increased soil salinity, and decreased water quality have made it increasingly clear that it is necessary to use new approaches based on smart technologies to increase fertilizer productivity and soil nutrition. This study aimed to spatially analyze soil properties (including organic carbon, electrical conductivity, pH, clay percentage, silt percentage, sand percentage, available phosphorus, and potassium) using the inverse distance weighting (IDW) geostatistical method and to provide solutions for integrating soil laboratory data into an integrated database and an agricultural spatial data infrastructure in an organizational environment. The data used was extracted from 2728 soil samples collected from reputable laboratories in Khorasan Razavi Province, with an emphasis on using existing data. The results showed that the spatial distribution of soil parameters in the province is heterogeneous and requires regional management. The establishment of an integrated system for soil data collection, improving fertilizer recommendations, and reducing the use of chemical inputs are among the suggestions of this study. The innovation of this research is that for the first time in the country, existing data has been used for analysis and decision-making, and to reduce the costs of soil sampling for the community and the operator.

* **Corresponding Author:** Sedigheh Maleki
Address: Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Email: s.maleki@saadi.shirazu.ac.ir
Tel: +989155338967

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Extended Abstract

1.1 Introduction

Agriculture, as one of the oldest and most vital human activities, has always been influenced by various factors. Among them, soil, as the main substrate for agricultural production, plays a key role in determining the success or failure of farmers. As technology advances and the need to produce more food for the world's growing population increases, the use of soil data as a powerful tool in agricultural decision-making has become increasingly important. As one of the most important sources of information in agriculture, soil data plays a vital role in improving decision-making and increasing agricultural productivity. By using this data, farmers can optimize their resources, increase crop yields, and at the same time protect the environment. On the other hand, scattered data from soil laboratories, which are often stored in the form of non-spatial reports, do not allow for the analysis of spatial patterns. This article aims to investigate the necessity of using native spatial soil data available in Khorasan Razavi Province to identify spatial patterns of soil properties using the IDW method and evaluate the use of these data to provide a framework for integrating laboratory data and converting them into operational recommendations and spatial information infrastructure.

1.2 Research Methodology

To prepare a soil properties map, all available information related to soil studies, soil monitoring, and data from private laboratories that had geographical coordinates were collected across the province, totaling 2728 soil samples. All soil samples were collected from the surface (0-30 cm depth) of agricultural and garden lands. Since soil sampling was not carried out uniformly, maps were not prepared in some areas, including Sarakhs, Salehabad, Gonabad, Bojestan, and Kohsorkh counties, due to the lack of sufficient coordinate data. Using the inverse distance weighting (IDW) geostatistical method, soil property maps were prepared and solutions were presented for integrating soil laboratory data into an integrated database and an agricultural spatial data infrastructure in an organizational environment.

1.3 Research Findings

The results indicate that collecting long-term, high-quality data on soil physical and chemical parameters in Khorasan Razavi Province can allow for more accurate predictions of input distribution or fertilizer recommendations. The findings confirm that soil heterogeneity in Khorasan Razavi Province is such that uniform fertilizer recommendations for the entire region are useless. For example, in the northern regions with higher organic carbon, a reduction in nitrogen fertilizer use and an increase in sulfur fertilizers are recommended, while the south and center of the province require salinity correction programs and phosphorus addition.

By creating, designing, and developing soil management software and soil databases based on the climatic and agricultural conditions of Khorasan Razavi, comprehensive and practical information can be provided to farmers and managers. In addition, it reduces fertilizer and water consumption by providing optimal solutions for nutrition and irrigation. Studies show that farmers who use soil test-based recommendations save up to 35% on fertilizer use. From a managerial perspective, the results of this study emphasize that the use of data and expert knowledge can serve as an efficient tool in improving agricultural decision-making. These tools are able to analyze extensive and complex soil data to provide practical and scientific recommendations that lead to increased productivity, reduced costs, and environmental protection. Also, accurate predictions can help policymakers formulate sustainable agricultural programs and optimize the use of soil and water resources.

1.4 Conclusion

The use of spatial soil data in Khorasan Razavi shows the necessity of precision agriculture due to the extreme soil heterogeneity in this province, so that recommending the same fertilizer for the entire region is useless. By integrating data into an integrated system and integrating geostatistical methods and digital technologies, specific fertilizer recommendations can be made (such as nitrogen reduction in the north and salinity management in the center and south). This approach increases productivity and reduces negative environmental impacts. However, there are challenges such as high cost, need for expertise, and limited access to technology. The solution is to create a collaborative data ecosystem, implement a pilot in Mashhad, train farmers, and integrate climate and management data to develop more advanced models.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Agricultural Jihad Organization of Khorasan Razavi Province for their scientific advice, guidance, and participation in collecting data for this article.

علمی پژوهشی

کشاورزی پایدار و تحلیل داده‌های پراکندهٔ خاک برای تصمیم‌سازی یکپارچه

صدیقه ملکی[۱]، جعفر جوادی[۲]

10.22080/JSN.2026.30693.1132

تاریخ دریافت:
۱۲ آذر ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش:
۱۲ اسفند ۱۴۰۴

چکیده

استان خراسان رضوی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور، نقش اساسی در امنیت غذایی و تولید محصولات استراتژیک ایران ایفا می‌کند. بااین‌حال، این استان با چالش‌های متعددی در زمینهٔ حکمرانی خاک و مدیریت نهادی-ساختاری نظام کشاورزی روبه‌رو است. تغییرات اقلیمی، افزایش شوری خاک و کاهش کیفیت آب ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای نوین مبتنی بر فناوری‌های هوشمند را بیش از پیش در راستای بالا بردن بهره‌وری کود و تغذیهٔ خاک آشکار کرده است. این مطالعه با هدف تحلیل مکانی خصوصیات خاک (شامل کربن آلی، هدایت الکتریکی، pH، درصد رس، درصد سیلت، درصد شن، فسفر و پتاسیم) با استفاده از روش زمین‌آماری وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) و ارائهٔ راهکارهایی برای تجمیع داده‌های آزمایشگاهی خاک در یک پایگاه دادهٔ یکپارچه و یک زیرساخت داده‌های مکانی کشاورزی در محیط سازمانی انجام شد. داده‌های مورد استفاده از ۲۷۲۸ نمونه خاک جمع‌آوری‌شده از آزمایشگاه‌های معتبر در سطح استان خراسان رضوی با تأکید بر استفاده از دادهٔ موجود استخراج شد. نتایج نشان داد که توزیع مکانی پارامترهای خاک در استان ناهمگن است و نیاز به مدیریت منطقه‌ای دارد. ایجاد سامانهٔ یکپارچه برای تجمیع داده‌های خاک، بهبود توصیه‌های کودی و کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی ازجمله پیشنهادات این مطالعه است. نوآوری این پژوهش بر این است که برای اولین بار در کشور اقدام به استفاده از داده‌های موجود در راستای تحلیل و تصمیم‌سازی و کاهش هزینه‌های جامعه و بهره‌بردار جهت نمونه‌برداری خاک انجام شده است.

کلیدواژه‌ها:
توسعهٔ پایدار؛ خراسان رضوی؛ داده‌های خاک؛ مصرف نهاده؛ نقشهٔ ویژگی‌های خاک

۲ مقدمه

کشاورزی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و حیاتی‌ترین فعالیت‌های بشر، همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار داشته است. در این میان، خاک به‌عنوان بستر اصلی تولید محصولات کشاورزی، نقش کلیدی در تعیین موفقیت یا شکست کشاورزان ایفا می‌کند. با پیشرفت فناوری و افزایش نیاز به تولید غذای بیشتر برای جمعیت رو به رشد جهان، استفاده از داده‌های خاک به‌عنوان ابزاری قدرتمند در تصمیم‌سازی‌های کشاورزی اهمیت بیشتری یافته است (Bouma et al., 2019). خاک به‌عنوان جزئی از طبیعت هم دارای تغییرپذیری ذاتی است که در نتیجه برهمکنش عوامل تشکیل‌دهندهٔ آن است و هم دارای تغییرپذیری غیر ذاتی می‌باشد که حاصل مدیریت کشت و کار، استفاده از اراضی و فرسایش است. به‌طوری‌که می‌توان گفت بین رخساره‌های زمین و کیفیت خاک آن‌ها ارتباطی قوی وجود دارد. در مناطق خشک، تغییرات خصوصیات خاک تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌ریخت‌شناسی (ژئومورفیک) قرار دارد (Mousavi et al., 2023; Maleki et al., 2020; Tomczyk et al., 2024). درک این تغییرات نه‌تنها برای مدیریت پایدار اراضی، بلکه برای پیش‌بینی واکنش خاک به تغییرات محیطی نیز حائز اهمیت است (Wang et al., 2023). یکی از اهداف اصلی در مدیریت پایدار اراضی، شناسایی مدیریت‌هایی است که از یک سو سبب ارتقاء کمی و کیفی تولید در طولانی مدت می‌شود و از سوی دیگر، سبب حفظ کیفیت خاک گردیده و از تخریب خاک جلوگیری می‌کند (Maleki et al., 2020). بنابراین به منظور مدیریت بهتر و پایدارتر، آگاهی از ویژگی‌های خاک و شناسایی عوامل مؤثر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک ضروری به نظر می‌رسد.

[۱] استادیار بخش علوم خاک، دانشگاه شیراز، ایران. نویسنده مسئول. s.maleki@saadi.shirazu.ac.ir
[۲] کارشناسی ارشد مدیریت آب و خاک و امور فنی و مهندسی، سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، ایران. jafar.javadi@yahoo.com

کشاورزی دقیق به‌عنوان یک پارادایم نوین در مدیریت کشاورزی، بر پایهٔ استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سنجش از دور، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و داده‌های مکانی استوار است (Bouma 2019; Rodrigo-Comino et al. 2020; Vullaganti et al., 2025). یکی از مهم‌ترین عناصر در کشاورزی دقیق، داده‌های خاک است که به‌عنوان پایه‌ای برای تصمیم‌گیری در مورد کوددهی، آبیاری و مدیریت زراعی عمل می‌کند.
داده‌های خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع اطلاعاتی در کشاورزی، نقش حیاتی در بهبود تصمیم‌گیری‌ها و افزایش بهره‌وری کشاورزی ایفا می‌کنند. با استفاده از این داده‌ها، کشاورزان می‌توانند منابع خود را بهینه‌سازی کنند، عملکرد محصولات را افزایش دهند و درعین‌حال از محیط زیست محافظت کنند.
در عصر حاضر که امنیت غذایی و پایداری محیط زیست به دغدغه‌های اصلی جهانی تبدیل شده‌اند، توجه به داده‌های خاک بیش از پیش ضروری است. سرمایه‌گذاری در جمع‌آوری، تحلیل و به‌کارگیری این داده‌ها می‌تواند آیندهٔ کشاورزی را متحول کند و راه را برای کشاورزی پایدار و هوشمند هموار سازد.
در حال حاضر، شواهد حکایت از آن دارد که سامانهٔ توزیع نهاده در تولیدات گیاهی تحت مدیریت سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، فاقد یک فرآیند یا مدل علمی مبتنی بر ویژگی‌های اختصاصی خاک هر منطقه است. در این نظام متعارف، تخصیص کود عمدتاً براساس وسعت زمین، میانگین‌های سرانه‌ای، حقابه و پیشنهادهای کلی صورت می‌پذیرد، بدون آنکه به داده‌های دقیق آزمایش خاک، از قبیل سطوح عناصر غذایی موجود (نیتروژن، فسفر، پتاسیم)، pH، EC، درصد مادهٔ آلی و بافت خاک توجهی مبذول شود. این ناهماهنگی بین نیاز واقعی مزرعه و نهاده تخصیص یافته، پیامدهای نامطلوبی را به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به کاهش کارآیی مصرف کود، افزایش هزینه‌های تولید، آلودگی منابع آب و خاک ناشی از شست‌وشوی عناصر غذایی و درنهایت، محقق‌نشدن پتانسیل ژنتیکی محصولات اشاره کرد. بنابراین، خلأ یک مکانیزم علمی برای توزیع کود براساس آنالیز کمی و کیفی خاک به‌عنوان مسأله‌ای محوری شناسایی گردید.
از سوی دیگر، داده‌های پراکنده آزمایشگاه‌های خاک که اغلب در قالب گزارش‌های غیرمکانی ذخیره می‌شوند، امکان تحلیل الگوهای فضایی را فراهم نمی‌کنند. Kumar et al. (2023) در بررسی نهادی سیستم‌های کشاورزی هند، به اهمیت به‌کارگیری سامانه‌های هوشمند در تسهیل تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران اشاره کرده‌اند. در یک مطالعه در استرالیا، Wilson & Brown (2021)، با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، موفق به پیش‌بینی دقیق تغییرات شوری خاک شدند که بهبود بهره‌وری خاک و کاهش هزینه‌های کشاورزی را به دنبال داشت. این مطالعه نشان داد که هوش مصنوعی و تهیهٔ نقشه‌های خاک می‌تواند ابزاری قدرتمند برای مدیریت بهینهٔ خاک و کاهش مشکلات محیطی باشد. Wang et al. (2023) نیز نشان دادند که این فناوری‌ها علاوه بر بهبود کیفیت پایش خاک، امکان توسعهٔ سیاست‌های کشاورزی مبتنی بر واقعیت‌های محیطی و نهادی را فراهم می‌آورند. این پژوهش‌ها تأکید دارند که ادغام فناوری‌های نوین و حکمرانی نهادی می‌تواند به بهبود مستمر کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی منجر شود و استفاده از هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های بزرگ به‌عنوان یک رویکرد نوین در مدیریت حکمرانی خاک، نه‌تنها می‌تواند باعث پیشرفت علمی در این حوزه شود؛ بلکه می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی برای حل مشکلات اساسی خاک و کشاورزی استان خراسان رضوی مطرح گردد.

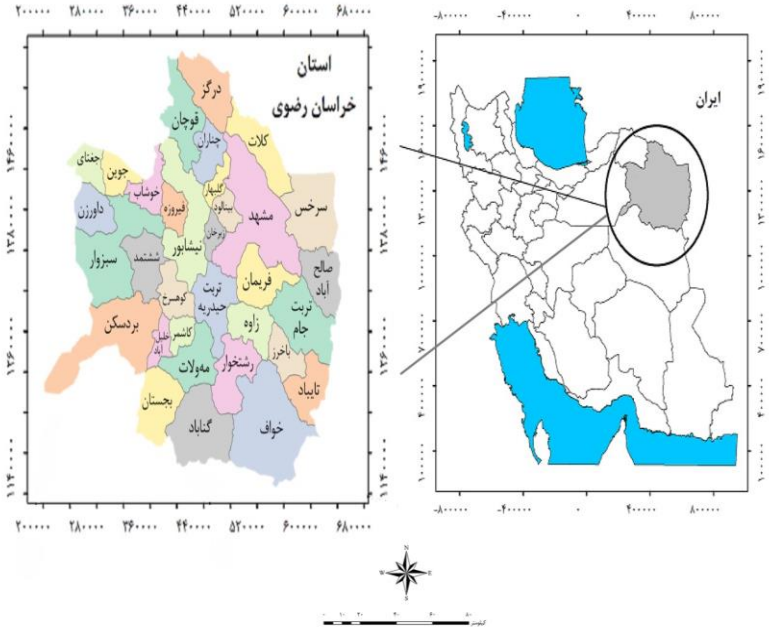
در دهه‌های اخیر، روش‌های زمین‌آماری به‌عنوان ابزاری کارآمد در پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک در مناطق خشک مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش با درنظرگرفتن ساختار مکانی تغییرات خاک و وابستگی مکانی بین نقاط نمونه‌برداری شده، امکان تخمین دقیق‌تری از توزیع مکانی پارامترهای خاک را فراهم می‌کند (Goovaerts, 2022). در مطالعهٔ حاضر، از روش معکوس فاصله (IDW) برای پهنه‌بندی خصوصیات خاک در تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های خاک در شهرستان‌های مختلف استفاده شده است. این انتخاب مبتنی بر توانایی مدل در مدل‌سازی تغییرات مکانی خاک حتی در شرایطی که داده‌های نمونه‌برداری محدود هستند، می‌باشد (Webster & Oliver, 2019).
استان خراسان رضوی به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی ایران، با تنوع خاک‌ها و شرایط اقلیمی متفاوت، نیازمند استفاده از داده‌های خاک مکانی پراکنده برای تصمیم‌سازی دقیق کشاورزی است. در ایران، استان خراسان رضوی با تولید بیش از ۴۰ درصد زعفران جهان و جایگاه برتر در کشت پسته، نقش حیاتی در امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند (Statistics and information of the Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2025). یکی از مشکلات مهم خراسان رضوی، شوری خاک و آب است. داده‌های حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد که در بسیاری از مزارع، هدایت الکتریکی (EC) خاک بیش از ۸ دسی‌زیمنس بر متر است که این سطح شوری می‌تواند عملکرد گندم را تا ۵۰٪ کاهش دهد (Vullaganti et al., 2025) . همزمان، کاهش مادهٔ آلی خاک (میانگین کم‌تر از ۰/۵٪) باعث افت ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی شده است (Lal, 2020). از طرفی، فقدان سامانه‌های یکپارچه پایش و تصمیم‌گیری، باعث شده اطلاعات موجود به‌موقع در سیاست‌گذاری‌ها به کار نرود (Kumar et al., 2023). هوش مصنوعی، با قابلیت پردازش حجم عظیم داده‌ها، می‌تواند این گسست را برطرف کند. نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های پراکندگی ویژگی‌های خاک نه‌تنها امکان شناسایی الگوهای مکانی تغییرات خاک را فراهم می‌کند، بلکه می‌تواند به درک بهتر رابطهٔ بین اجزای خاک و توزیع مکانی ویژگی‌های مؤثر بر تغییرات خاک نماید (Zeraatpisheh et al., 2019) .
این پژوهش با ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل مکانی، راهکارهایی برای بهبود تصمیم‌سازی کشاورزی در چهارچوب سازمانی ارائه می‌کند. ازاین‌رو مقاله با هدف بررسی لزوم استفاده از داده‌های خاک مکانی موجود در استان خراسان رضوی، به منظور شناسایی الگوهای مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از روش IDW و تبدیل آن‌ها به توصیه‌های عملیاتی و زیر ساخت اطلاعات مکانی تهیه گردیده است. داده‌های خاک مکانی موجود در این پژوهش شامل اطلاعاتی

مانند اجزای ذرات خاک، pH، هدایت الکتریکی، کربن آلی، پتاسیم و فسفر قابل جذب خاک است. بر اساس این، انجام پژوهش حاضر با هدف تهیهٔ نقشهٔ خصوصیات خاک در سطح استان خراسان رضوی تهیه شده است که مستقیماً متکی بر نتایج آزمایشگاه‌های خاکشناسی بوده و امید آن است که نتایج آن برای طراحی و استقرار یک الگوی فرموله‌شدهٔ توزیع کود، در استان خراسان رضوی باشد.

۳ مبانی نظری

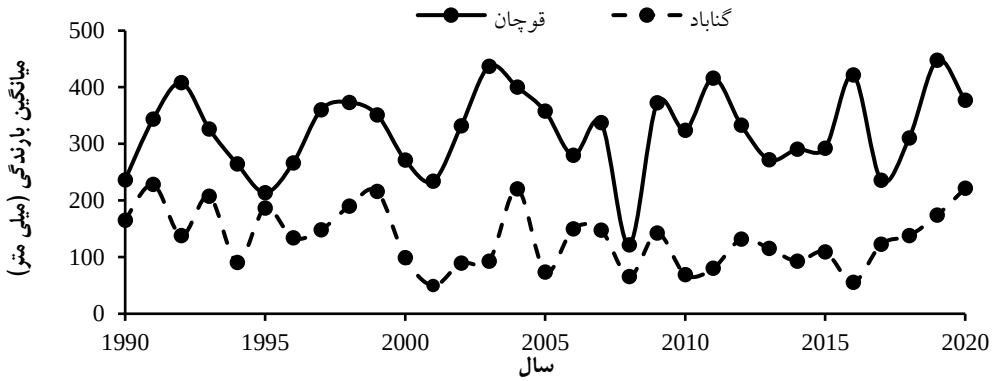
۳,۱ . موقعیت منطقهٔ مطالعاتی

استان خراسان رضوی رضوی پنجمین استان پهناور کشور با مساحت ۱۱۹۱۰۹ کیلومتر مربع که در شمال شرق ایران بین مدار جغرافیایی ´ ۳۳°۵۲ تا ´ ۳۷°۴۲ عرض شمالی و ´ ۵۶°۱۹ تا ´ ۶۱°۱۶ دقیقهٔ طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این استان از شمال و شمال شرق به کشور ترکمنستان، از شرق به کشور افغانستان، از جنوب و جنوب شرق به استان خراسان جنوبی، از غرب به استان‌های یزد و سمنان و از شمال غرب به استان خراسان شمالی محدود است. این استان با در برداشتن بیش از هفت درصد از مساحت ایران، از ۳۳ شهرستان، ۷۹ بخش، ۱۷۵ دهستان و ۸۱ شهر تشکیل شده است و با وجود ۶/۵ میلیون نفر جمعیت، دومین استان پرجمعیت ایران به‌شمار می‌آید (Statistics and information of the Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2025).

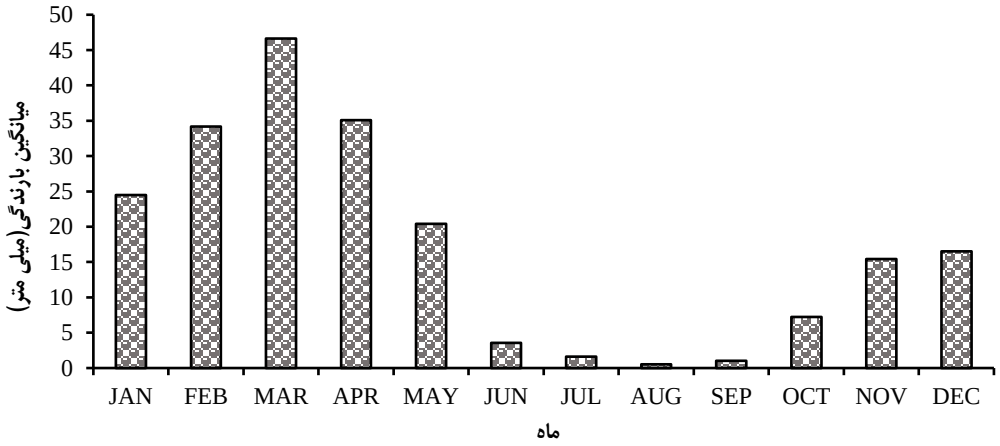


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی (الف) در کشور ایران، (ب) شهرستان‌های استان خراسان رضوی

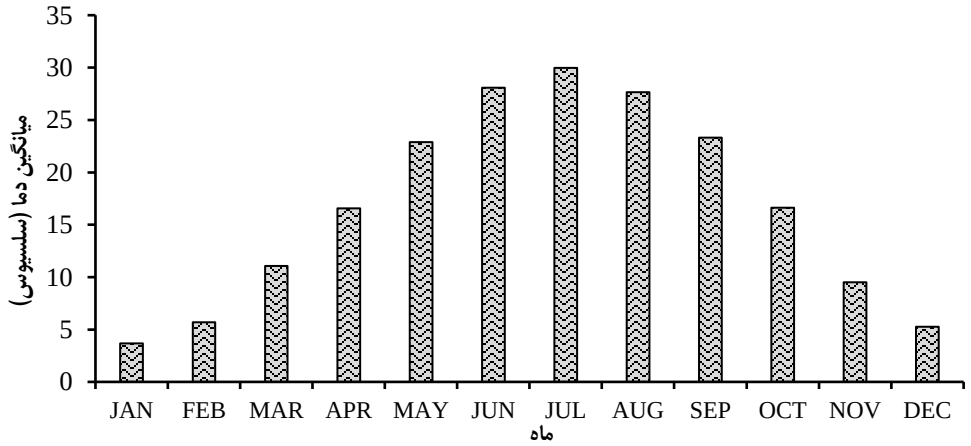
بررسی میانگین سالانه بارش در مناطق مختلف استان نیز، نشانگر آن است که با حرکت از شمال به سمت جنوب استان خراسان رضوی، از مقدار بارش کاسته می‌شود. به‌طوری‌که کم‌ترین میانگین بلندمدت بارش سالانه در جنوبی‌ترین نقطه استان، شهرستان گناباد با ۱۳۳/۲ میلی‌متر (شکل ۲) و پس از آن در شهرستان‌های جنوبی بردسکن و خواف به ترتیب با ۱۴۴/۰ و ۱۴۴/۳ میلی‌متر محاسبه شد. قرارگرفتن در عرض‌های پایین جغرافیایی و دوری از جبهه‌های ورودی بارش‌زا دلیل اصلی این کاهش است. در مناطق شمالی استان، بیشترین میانگین بلندمدت بارش سالانه به‌ترتیب در ایستگاه‌های قوچان با ۳۱۶/۸ میلی‌متر، کلات نادر با ۲۶۶/۴ میلی‌متر و فریمان با ۲۶۴/۶ میلی‌متر به دست آمد که وجود ارتفاعات و قرارگرفتن در عرض‌های بالا از عوامل اصلی افزایش میزان بارش در این مناطق است (شکل ۲). همچنین بررسی میزان بارندگی ماهانه در مناطق مختلف استان نشان داد که بیشترین میزان بارش در تمامی ایستگاه‌های استان خراسان رضوی (به‌جز ایستگاه درگز، آن هم در دو سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹) در ماه مارس (۱۰ اسفند الی ۱۰ فروردین) اتفاق می‌افتد. شکل ۳ و ۴ به ترتیب میانگین ماهانهٔ بارندگی و دما را در بازهٔ زمانی از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹ نشان می‌دهند.



شکل ۲. نمودار میانگین بارندگی ۳۰ ساله در کم‌بارش‌ترین و پر بارش‌ترین مناطق استان خراسان رضوی



شکل ۳. میانگین بارش ماهیانهٔ تمامی مناطق استان در بازهٔ زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹



شکل ۴. میانگین دمای ماهیانهٔ تمامی مناطق استان در بازهٔ زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹

آمارهای منتشرشدهٔ وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که سطح زیر کشت استان خراسان رضوی در سال‌های اخیر کاهش داشته است؛ به‌طوری‌که میزان اراضی کشاورزی استان از حدود ۱۷۹۰۷۰۶ هکتار در سال ۸۷ (شامل ۶۰۸۶۷۵ هکتار اراضی کشت آبی، ۱۶۹۶۱۶ هکتار کشت دیم، ۲۸۶۳۸۸ هکتار اراضی باغی و حدود ۷۲۶۰۲۷ هکتار آیش) به حدود ۱/۰۶ میلیون هکتار (Reports on the status of soils in Khorasan Razavi, 2023) و به ۸۷۵ هزار هکتار در سال ۱۳۹۷ کاهش داشته است. خاک‌های این استان غالباً در سه رده انتی‌سولز، اریدی‌سولز و اینسپتی‌سولز قرار دارند (Banaei, 2002). براساس اطلاعات موجود بیش از ۴۰ درصد از کل مساحت خاک‌های استان مناسب کشاورزی با درجه کلاس I، II، III محدودیت می‌باشد که بیش از سه برابر مساحت زیر کشت فعلی می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱. سطوح مطالعات خاک‌شناسی انجام شده و انواع کلاس خاک‌ها در استان خراسان رضوی (Reports on the status of soils in Khorasan Razavi, 2023)

	کلاس خاک						سایر	متفرقه
	I	II	III	IV	V	VI		
مساحت (هکتار)	۱۶۹۸۰۱	۳۰۰۳۳۱	۳۵۳۱۵۱	۳۵۶۱۰۱	۴۵۱۹۸	۱۱۳۰۹۸	۱۳۷۴۸	۱۴۵۴
سهم (درصد)	۱۲/۶	۲۲/۲	۲۶/۱	۲۶/۳	۳/۳	۸/۴	۱	۰/۱

استان خراسان رضوی در سال ۱۴۰۳ ۶۴۰۷۹۳۹ تن، ۶/۵ درصد از تولیدات بخش کشاورزی کشور را دارد و از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین تولید کنندگان محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود. این در حالی است سهم تولیدات آبی محصولات زراعی در این استان ۶۳۴۱۹۱۰ تن و سهم تولیدات دیم ۶۶۰۲۹ تن درصد از تولیدات کشور را شامل می‌شود. از کل اراضی کشت شده در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ میزان تولید محصولات از سطح کل اراضی در حدود ۸۷۱۸۶۷ هکتار بوده که ۷۴۳۷۸۴ هکتار مساحت اراضی آبی و ۱۲۸۰۸۳ هکتار متعلق به اراضی با کشت دیم می‌باشد (Statistics and information of the Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2025).

٤ روش تحقیق

٤,١ جمع‌آوری داده‌ها و آنالیز آزمایشگاهی

برای تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های خاک کل اطلاعات موجود مربوط به انجام مطالعات خاک‌شناسی، پایش خاک‌ها و داده‌های آزمایشگاه‌های خصوصی که دارای مختصات جغرافیایی بودند در سطح استان به تعداد ۲۷۲۸ نمونه خاک جمع‌آوری گردید. نمونه‌های خاک، همه از سطح (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) اراضی زراعی و باغی جمع‌آوری شد. ازآنجایی‌که نمونه‌برداری خاک‌ها به‌طور یکنواخت انجام نشده است در برخی مناطق ازجمله شهرستان‌های سرخس، صالح‌آباد، گناباد، بجستان و کوهسرخ به دلیل عدم وجود دادهٔ کافی مختصات‌دار از تهیهٔ نقشه‌ها خودداری شده است. شایان ذکر است علی‌رغم تعداد نمونه در شهرستان‌های باخرز و کلات در این دو شهرستان، به دلایل زیر، نقشهٔ ویژگی‌های خاک تهیه شدند.

۱. پوشش کامل و فاصلهٔ مناسب نمونه‌ها، علی‌رغم تعداد کم در این دو منطقه

۲. اهمیت کشاورزی منطقه: شهرستان‌های کلات و باخرز با توجه به موقعیت جغرافیایی و فعالیت‌های کشاورزی موجود (به‌ویژه در زمینهٔ محصولات استراتژیک)، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند که تهیهٔ نقشه را برای آن‌ها ضروری می‌ساخت.

۳. قابلیت روش‌های زمین‌آماری: روش‌های درون‌یابی مکانی مورد استفاده) به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با بهره‌گیری از ساختار مکانی و همبستگی فضایی داده‌ها، قادر به تخمین مقادیر در مناطقی با تراکم نمونه، کم‌تر نیز هستند، هرچند با قطعیت کم‌تر.

جدول ۲، پراکندگی نمونه‌های خاک در هر شهرستان از استان خراسان رضوی را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پراکندگی تعداد نمونه‌های خاک مکان‌دار جهت تهیهٔ نقشهٔ برخی ویژگی‌های خاک استان خراسان رضوی

ردیف	شهرستان	تعداد نمونه خاک	ردیف	شهرستان	تعداد نمونه خاک
۱	باخرز	۲۰	۱۸	سبزوار	۹۰
۲	بجستان	۲۰	۱۹	سرخس	۴۸
۳	بردسکن	۳۲۴	۲۰	ششتمد	۲۲

ردیف	شهرستان	تعداد نمونه خاک	ردیف	شهرستان	تعداد نمونه خاک
۴	تایباد	۹۱	۲۱	صالح آباد	۲۸
۵	تربت جام	۸۴	۲۲	طرقبه شاندیز	۵
۶	تربت حیدریه	۸۵	۲۳	فریمان	۱۷۷
۷	جغتای	۹۷	۲۴	فیروزه	۵۷
۸	جوین	۸۹	۲۵	قوچان	۱۲۴
۹	چناران	۵۳	۲۶	کاشمر	۱۶
۱۰	خلیل اباد	۴۹	۲۷	کوهسرخ	۱۲
۱۱	خواف	۵۹	۲۸	کلات	۲۴
۱۲	خوشاب	۶۴	۲۹	گلبهار	۲۴
۱۳	داورزن	۲۰	۳۰	گناباد	۴۲
۱۴	درگز	۹۰	۳۱	مشهد	۱۴۱
۱۵	رشتخوار	۵۷	۳۲	مه ولات	۳۱۹
۱۶	زاوه	۲۴	۳۳	نیشابور	۱۸۷
۱۷	زبرخان	۱۸۸	جمع کل		۲۷۲۸

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل جداسازی اجزای مختلف شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری بایکوس پس از جداسازی ذرات شن و قرائت هیدرومتر پس از حدود ۵/۵ الی ۶/۵ ساعت (بر اساس دما) برای تمامی نمونه‌های خاک انجام شده است (Bouyoucos, 1962). اندازه‌گیری pH گل اشباع به وسیلهٔ الکترود شیشه و قابلیت هدایت الکتریکی در عصارهٔ گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج (Page et al., 1982)، کربن آلی به روش سوزاندن تر با دی کرومات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ (Walkley & Black, 1934)، فسفر قابل جذب به وسیلهٔ عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم ۰/۵ نرمال (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل جذب خاک از روش عصاره‌گیری با استات آمونیم در pH خنثی و تعیین غلظت پتاسیم با استفاده از فلیم‌فتومتر قرائت گردید (Soil Survey Staff, 1996).

۴,۲ توصیف آماری داده‌ها

به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دست‌یابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری هر خصوصیت، توزیع فراوانی با کمک ویژگی‌های آن شامل میانگین، میانه، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی توسط نرم‌افزار SPSS 22 مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آزمون نرمال‌بودن توزیع متغیرها، آزمون کولموگروف –اسمیرونوف استفاده شد.

۴,۳ مدل‌سازی مکانی (آنالیزهای زمین آماری)

در این پژوهش برای پهنه‌بندی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات معلوم، با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به دست می‌آید. به عبارت دیگر، در این روش ارزش یک متغیر براساس میانگین همسایه‌ها در محدوده‌های معین محاسبه می‌شود. به این ترتیب که معکوس فواصل از نقاط مجهول وزن‌دهی می‌شود. هرچه فاصلهٔ نقطهٔ مجهول از نقاط معلوم کاهش یابد، وزن ارزش آن نقاط افزایش می‌یابد و نقاطی که ارزش آن نامعلوم است با استفاده از نقاط اطراف در یک شعاع مشخص برآورد می‌شود (Shukla et al., 2020; Goovaerts, 2022). مقدار فاکتور وزنی با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد.

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^{\alpha}} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^{\alpha}}}$$

که در آن d_i :عبارت از فاصلهٔ بین نقطهٔ تخمین تا هرکدام از نمونه‌های واقع در همسایگی آن $Z(x_i)$:مقدار مشاهده‌شدهٔ ویژگی مورد نظر در نقطهٔ x_i و α عبارت از توان معکوس فاصله (پارامتر نمایی)، $\hat{Z}(x_0)$ مقدار تخمینی ویژگی هستند.

هرچه فاصلهٔ دادهٔ معلوم از نقطهٔ مجهول افزایش یابد، وزن‌ها براساس فاصله کاهش می‌یابد. هنگامی که توان صفر است، نقش فاصله از بین می‌رود و مقدار نامعلوم از میانگین نقاط همسایه به دست می‌آید و اگر توان افزایش یابد، نقش فاصله افزایش می‌یابد. پارامتر بهینه‌سازی توان ۲ برای کاهش اثر فاصله در این زمینه استفاده شد. در این پژوهش روش IDW براساس چند معیار فنی برای درون‌یابی پارامترهای خاک انتخاب شد: نخست، سازگاری با ماهیت داده‌های خاک که تغییرات تدریجی دارند و حفظ ساختار محلی تغییرات. دوم، سادگی و شفافیت محاسباتی که تفسیر نتایج را آسان‌تر می‌کند. سوم، عملکرد مناسب با توجه به پراکندگی نمونه‌های موجود که با معیارهای اعتبارسنجی تأیید شده است. چهارم، قابلیت کنترل تأثیر نقاط دور با تنظیم پارامتر توان. همچنین مقایسهٔ اولیه با سایر روش‌ها، عملکرد بهتر IDW را در منطقهٔ مطالعاتی نشان داد.

به منظور مقایسهٔ روش‌های مورد استفاده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین‌آمار، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطهٔ مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیهٔ نقاط، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همهٔ نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به‌طوری‌که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. در این مطالعه از پارامترهای میانگین خطا (ME) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. معیار ME هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ دقت بیشتر روش می‌باشد؛ برای انتخاب یک روش درون‌یابی از بین روش‌های مختلف لازم است روشی انتخاب گردد که خطای کم‌تری داشته باشد.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}[Z^*(Xi) - Z(Xi)]}{n} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(Xi) - Z(Xi))2}{n}} \quad (۴)$$

که در این دو معادله Z*(xi) مقدار برآوردی در نقطهٔ iام و Z (xi) مقدار مشاهده‌ای برای نقطهٔ iام می‌باشد. پس از تعیین بهترین مدل، از نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 جهت ترسیم نقشه استفاده شد.

شایان ذکر است ابتدا نقشه‌ها براساس داده‌های موجود در هر شهرستان تهیه و سپس با استفاده از دستور merge نقشهٔ کلی استان تهیه شد.

۵ یافته‌ها و بحث

وضعیت توزیع داده‌ها برای کارهای آماری و ازجمله زمین‌آمار از اهمیت قابل توجه‌ای برخوردار می‌باشد. در صورت نرمال‌بودن یا نزدیک به نرمال‌بودن توزیع داده‌ها، روش‌های تخمین مورد استفاده در زمین آمار از دقت بالایی برخوردار خواهند بود. توصیف آماری ویژگی‌های خاک در جدول ۳ خلاصه شده است. آزمون نرمالیته داده‌ها به وسیلهٔ آزمون کولموگروف – اسمیرنوف نشان داد که هر دو متغیر از توزیع نرمال برخوردار هستند. به‌علاوه مقادیر چولگی ارائه شده در جدول ۳ نیز ارائه گردیده است.

جدول ۳. توصیف آماری ویژگی‌های خاک بررسی‌شده در اراضی زراعی استان خراسان رضوی

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر	میانه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغیرات	چولگی
هدایت الکتریکی	$dS\ m^{-1}$	۰/۱۴	۶۴/۹۰	۲/۶۳	۴/۹۵	۶/۶۹	۱۳۵	۳/۸۱
pH	-	۶/۵۰	۹/۰۶	۸/۰۰	۷/۹۲	۰/۲۷	۳	-۰/۴۱
کربن آلی	%	۰/۰۱	۱/۵۰	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۲۶	۶۱	۱/۳۹
رس	%	۱/۰۰	۵۸/۰۰	۱۸/۰۰	۱۸/۶۳	۷/۳۶	۰/۳۹	۰/۶۰
سیلت	%	۲/۰۰	۸۹/۹۹	۳۹/۰۰	۳۸/۰۴	۱۲/۵۴	۳۳	-۰/۳۵
شن	%	۶/۰۰	۹۳/۰۰	۴۲/۰۰	۴۳/۰۰	۱۵/۹۰	۳۷	۰/۴۹
فسفر قابل جذب	$mg\ kg^{-1}$	۰/۱۰	۷۳/۷۵	۶/۰۰	۸/۵۲	۸/۲۸	۹۷	۲/۹۹
پتاسیم قابل جذب	$mg\ kg^{-1}$	۲/۷۳	۷۵۴/۹۳	۲۱۹/۳۸	۲۳۹/۳۰	۱۱۵/۲۵	۴۸	۱/۲۷

یکی از عوامل محدودکنندهٔ خاکی در برخی مناطق مختلف این استان شوری خاک‌ها است. براساس نتایج نقشه شوری خاک استان در حدود ۶۰ درصد دارای درجه شوری خاک کم‌تر از ۴ دسی زیمنس بر متر و سایر نمونه‌های خاک از اراضی کشاورزی استان مبتلا به درجات مختلف شوری از محدودیت نسبتاً

زیاد تا بسیار زیاد می‌باشد (شکل ۵ الف). براساس این مطالعه حدود ۱۵/۵ درصد از این اراضی دارای شوری ۴ تا ۶ دسی زیمنس بر متر و حدود ۱۲ درصد دارای شوری ۶ تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر هستند. بر اساس این، میانگین شوری خاک در کلیهٔ اراضی کشاورزی استان ۴/۹۵ دسی زیمنس بر متر برآورد شده است (جدول ۳). ناهمگونی نقشهٔ شوری خاک در شهرستان‌های مختلف استان خراسان رضوی نشان‌دهندهٔ ضرورت توصیه‌های کودی اختصاصی در راستای افزایش جذب عناصر غذایی مورد نیاز هست. همچنین ضرورت توجه به مدیریت شوری در مناطق با مقادیر برای شوری و اقدامات اصلاحی در این خصوص است.

وضعیت pH خاک در مناطق مختلف حاکی از آن است که دامنهٔ تغییرات این ویژگی از ۶/۵۰ تا ۹/۰۶ بوده که غالب استان در حدود ۹۶ درصد دامنهٔ pH بین ۷/۵۰ تا ۸/۵۰ را دارند و کم‌تر از یک درصد pH بالاتر از ۸/۵۰ دارند. یکی از مشکلاتی که در خاک‌های ایران و استان خراسان رضوی وجود دارد pH قلیایی بالاتر از ۷ است، کمبود بارندگی و دارا بودن اقلیم خشک باعث تجمع عناصر بازی در خاک شده و در نتیجه خاک قلیایی می‌شود. در برخی از شرایط و مناطق استان، pH زیاد نتیجهٔ وجود آهک است. این در حالی است که با بررسی نتایج نمونه‌های خاک در بیشتر موارد (۷۳ درصد) میزان کربنات کلسیم خاک بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است. مهم‌ترین اثر نامطلوب زیادی مقدار آهک در خاک‌های زراعی، ترکیب با بعضی از عناصر غذایی و تبدیل آن‌ها به ترکیبات تقریباً نامحلول و غیر قابل استفاده برای گیاه است. گرچه وجود کربنات کلسیم در خاک سبب تشکیل خاکدانه و ایجاد ساختمان مناسب در خاک می‌شود، ولی مقدار زیاد آن با ایجاد لایه‌های سخت و غیرقابل نفوذ در خاک و همچنین ایجاد ناهنجاری‌های تغذیه‌ای سبب ایجاد اختلال در رشد گیاه می‌شود (Weil & Brady, 2016) همچنین وجود لایه‌های غیرقابل نفوذ یا با قابلیت نفوذ کم، مشکلات تهویه‌ای را برای ریشه و به‌خصوص پس از آبیاری ایجاد می‌کند و این امر نیز بر مشکلات تغذیه‌ای گیاه می‌افزاید (Lynch, 2018). خاک‌های آهکی ظرفیت بالایی برای تثبیت عناصر غذایی از قبیل فسفر و عناصر کم‌مصرف (ریز مغذی) به‌ویژه آهن و روی دارند. به همین دلیل مصرف کودهای معدنی حاوی این عناصر از بازدهی اندکی برخوردارند (Lindsay & Schwab, 1982). بدیهی است که نقش مستقیم آهک (اثر رقابت یون کلسیم) در ایجاد کمبود آهن و روی کم می‌باشد و عاملی که قابلیت استفادهٔ این عناصر را تحت تأثیر قرار می‌دهد نقش غیرمستقیمی است که آهک به‌واسطهٔ تأثیر بر روی pH خاک اعمال می‌کند.

از دیگر سو، بالارفتن مقادیر سدیم در خاک‌های شور- سدیمی، سبب می‌گردد pH افزایش یابد (Lindsay & Schwab, 1982). شکل ۵ ب وضعیت خاک‌های استان از نظر pH را نشان می‌دهد. اصولاً اصلاح pH خاک، کار مشکلی است، برای کاهش موضعی pH خاک باید از برخی مواد اصلاح‌کننده یا کاهش‌دهندهٔ pH استفاده شود؛ یعنی اینکه در بخشی از اراضی همراه آبیاری، اسید سولفوریک و گوگرد آلی به خاک اضافه گردد تا pH خاک را به‌طور موضعی کاهش داده و جذب عناصر غذایی و راندمان بهره‌وری کود افزایش یابد.

مادهٔ آلی نقش اساسی در تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ایفا می‌کند و آگاهی از وضعیت و پراکنش آن برای بهره‌برداری پایدار و بهینه از خاک حائز اهمیت است (Tunçay et al., 2022; Song & Wei, 2022). به همین دلیل، تهیهٔ نقشهٔ پراکنش این عنصر مهم خاک می‌تواند دیدگاه بهتری برای مدیریت منطقه به کاربران ارائه دهد. حداقل درصد کربن آلی در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه ۰/۰۱ و حداکثر آن ۱/۵۰ و متوسط آن برابر با ۰/۴۳ درصد می‌باشد. بیشترین وسعت منطقه در حدود ۶۸ درصد دارای میزان کربن آلی کم‌تر از ۰/۵۰ درصد بوده است (شکل ۵ ج). مقادیر بیشتر از ۰/۵۰ تا ۱ درصد به صورت لکه‌ای بیشتر در شمال استان به دلیل وجود میزان بارندگی بیشتر و دمای پایین‌تر مشاهده می‌گردد (شکل ۵ ج). مقدار اندک کم‌تر از نیم درصد نمونه‌های بررسی شده به‌صورت لکه‌ای در شهرستان چناران دارای مقدار کم کربن آلی بیشتر از یک درصد می‌باشد که دلیل آن استفاده از کود حیوانی پوسیده و احتمالاً وجود کاه و کلش باقیمانده در سطح خاک بوده است. بنابراین چنین به نظر می‌رسد به دلیل خشک‌بودن اقلیم استان و پایین بودن سطح مدیریت کربن آلی افزایش حفظ و نگهداری مادهٔ آلی ضروری است.

علت کمبود مواد آلی می‌تواند به دلیل کشت و کار و شخم‌زدن مداوم اراضی و همچنین عدم توجه به ملاحظات افزایش مواد حاوی کربن آلی قابل توجه، مدیریت بقایا در سطح می‌باشد ((;Lal, 2020. کشت‌های متراکم و بدون تناوب زراعی، یکی دیگر از علل کاهش مادهٔ آلی خاک است که بیشتر این کشت‌ها گیاهانی هستند که خودشان برای تولید محصول مناسب، نیازمند خاکی با ماده آلی فراوان هستند و کشت آن‌ها بر شدت تخلیهٔ خاک از مواد آلی می‌افزاید (Fathi et al., 2020; Hosseinzadeh et al.,2025).

فسفر و پتاسیم قابل جذب به همراه نیتروژن کل به‌عنوان عناصر غذایی ماکرو خاک از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک مطرح هستند (Maleki et al., 2022; Tunçay et al., 2021). از دیدگاه مکانی نقشه‌های توزیع عناصر غذایی خاک از اهمیت بالایی در مدیریت حاصل‌خیزی خاک برخوردار می‌باشد. ازآنجایی‌که میزان نیتروژن خاک در منطقه حدود ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۶ بوده و میانگین آن ۰/۰۳ درصد در کل منطقه با توجه به یکنواخت شدن کلاس نیتروژن نقشه پهنه‌بندی و اطلاعات آن ارائه نشده است.

حداقل میزان فسفر در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه ۰/۱۰ و حداکثر آن ۷۳/۷۵ و متوسط آن برابر با ۸/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (جدول ۵). نتایج درصد تغییرات پراکنش مکانی محدوده‌های فسفر در منطقه حاکی از ضریب تغییرات بالای آن است (۹۷ درصد) و نشان از تاثیرپذیری آن از شرایط مدیریتی در منطقه دارد. فسفر قابل جذب حدود ۶۵ درصد از اراضی کشاورزی مطالعه شده در حدود ۱۰-۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده و در منطقهٔ جنوب شرقی به‌خصوص شهرستان تایباد و بخشی از مرکز منطقه در دامنهٔ زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته (مقادیر بالاتر از ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و عدم مصرف کود

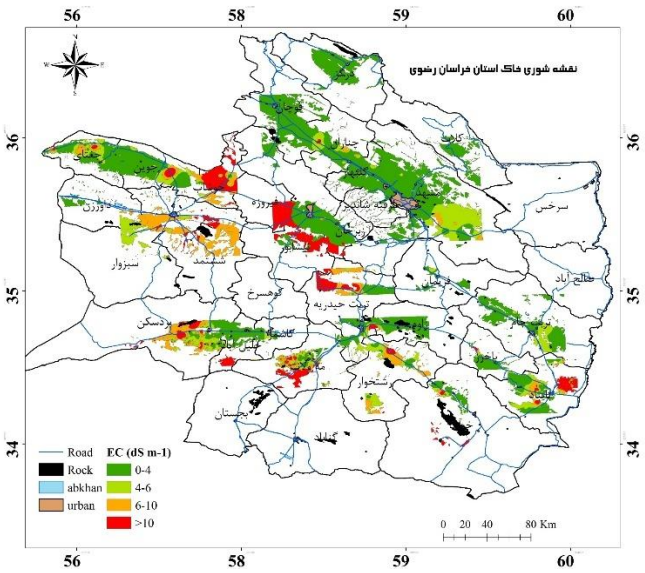
در شرایط فعلی توصیه می‌گردد. ۲۳/۵۰ درصد از مساحت منطقه دارای فسفر در حد کفایت می‌باشد که مناطق مرکزی و شمالی استان را شامل می‌شود (شکل ۵ د).

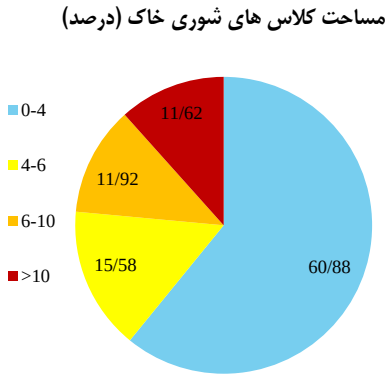
فسفر باعث تقویت سیستم ریشه‌ای، بهبود رشد گیاه، افزایش عملکرد محصول و بالا بردن کیفیت و مقاومت در برابر بیماری‌ها می‌شود (Archana et al., 2016). حداکثر میزان فسفر محلول در pH ۶ تا ۶/۵ مشاهده می‌شود. بنابراین رساندن pH خاک به این حدود می‌تواند در افزایش محلول بودن و جذب فسفر مؤثر باشد (Singh et al., 1988). تغییر موضعی pH در خاک‌های اسیدی با اضافه‌کردن آهک و در خاک‌های قلیایی با اضافه‌کردن گوگرد یا کودهای اسیدی که پیش از این در قسمت pH به‌طور کامل تشریح و بحث گردیده انجام می‌شود. میزان محلول بودن کودهای فسفره نیز متغیر است.

حداقل میزان پتاسیم در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه ۲/۷۳ و حداکثر آن ۷۵۴/۹۳ و متوسط آن برابر با ۲۱۹/۳۸ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (جدول ۴). براساس شکل (۵ ذ) بیش از نیمی از کل منطقهٔ مورد مطالعه دارای پتاسیم قابل جذب خاک ۲ تا ۲۵۰ پی‌پی‌ام که نیازمند مصرف کود می‌باشند. خوشبختانه حدود ۳۱ درصد در حد کفایت و مقدار ۱۴ درصد دارای مقادیر خیلی زیاد پتاسیم می‌باشند. بنابراین، با توجه به نقشهٔ پراکنش ارائه شده در شکل (۵ ذ) عدم مصرف کود توصیه می‌گردد. این مناطق بیشتر در شهرستان تربت‌حیدریه و تا حدودی شما غرب منطقه شامل خوشاب و جغتای قرار می‌گیرند. که بیشتر منطبق با نقشه درصد رس خاک بوده که در مناطق با رس بیشتر از ۲۰ درصد قرار گرفته‌اند (شکل ۵ ذ).

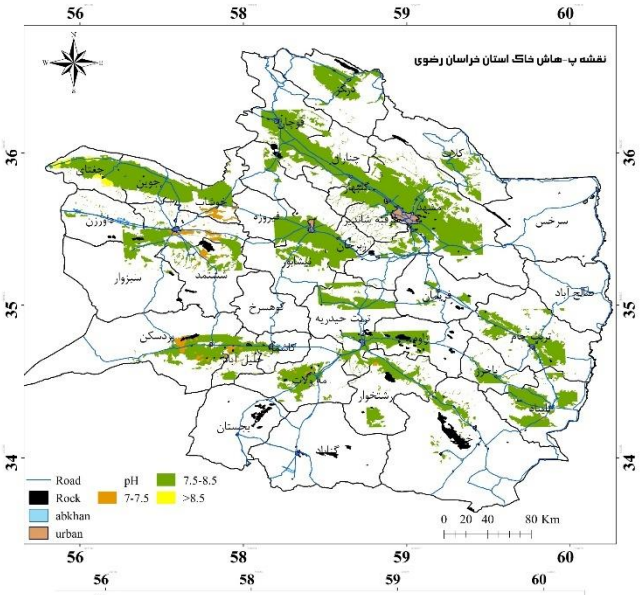
حداقل درصد سیلت و رس به ترتیب در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه ۲ و ۱ و حداکثر آن‌ها ۹۰ و ۵۸ درصد، میانگین آن‌ها برابر با ۳۹ و ۱۸ درصد می‌باشد (جدول ۵). براساس چند لکه با میزان درصد سیلت بیش از ۶۰ درصد در شهرستان‌های چناران، کاشمر، خلیل آباد و قوچان دیده می‌شود. در حدود ۹۰ درصد اراضی مطالعاتی دارای مقادیر رس بین۱۰ تا ۳۰ درصد و به‌صورت لکه‌ای در سبزوار مقادیر رس بیشتر از ۴۰ درصد در سمت شمال این شهرستان دیده می‌شود (شکل ۵ ر) که ارتباط با وضعیت زمین‌شناسی منطقه و نزدیکی به کفه رسی پلایای سبزوار می‌باشد. بیشترین مساحت اراضی دارای رس کم‌تر از ۱۰ درصد هستند. براساس نقشهٔ دامنه، درصد سیلت در حدود نیمی از اراضی منطقهٔ مورد مطالعه ۴۵-۳۰ درصد می‌باشد که در مناطق شرقی تا غربی منطقه پراکنده می‌باشند (شکل ۵ ز).

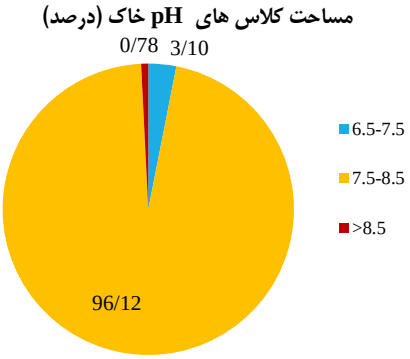
حداقل درصد شن در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه ۶ و حداکثر آن ۹۳ درصد و متوسط آن برابر با ۴۳ درصد می‌باشد. براساس نقشهٔ درصد شن در منطقهٔ مورد مطالعه، به‌طورکل حدود ۴۷ درصد از اراضی دارای مقادیر درصد شن ۲۵ تا ۴۰ درصد و حدود ۴۲ درصد دارای مقادیر ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشند (شکل ۵ ه).



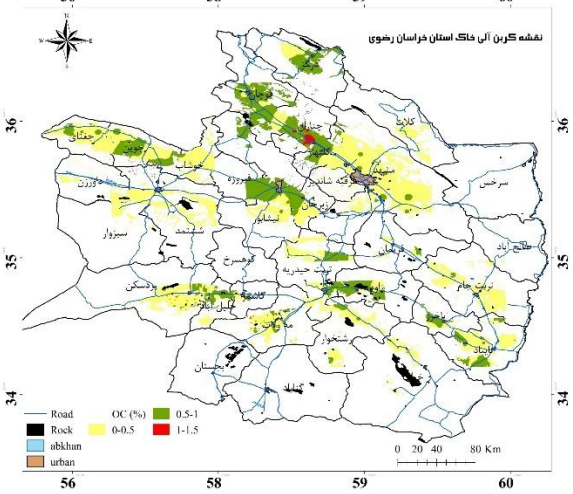


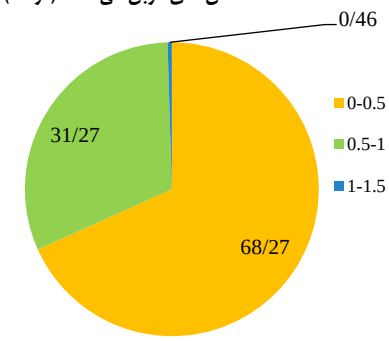
الف


نقشه پ- هاش خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
pH
7-7.5
7.5-8.5
>8.5
0 20 40 80 Km

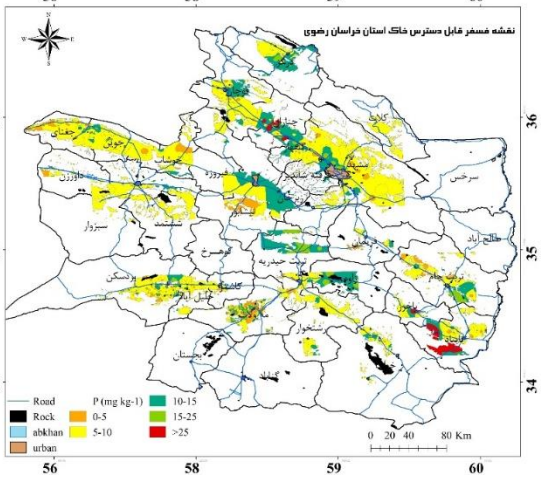

مساحت کلاس های pH خاک (درصد)
0/78
3/10
96/12
6.5-7.5
7.5-8.5
>8.5

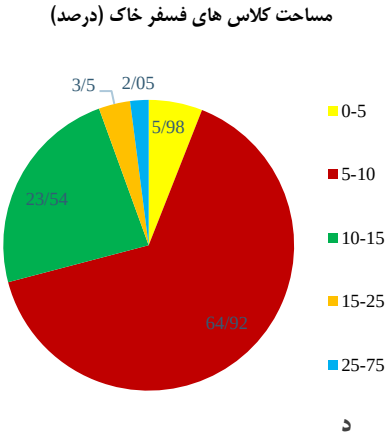
ب


نقشه کربن آلی خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
OC (%)
0-0.5
0.5-1
1-1.5
0 20 40 80 Km

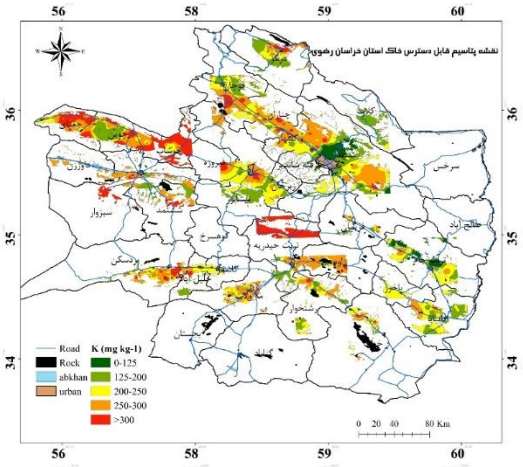

مساحت کلاس های کربن آلی خاک (درصد)
0/46
31/27
68/27
0-0.5
0.5-1
1-1.5

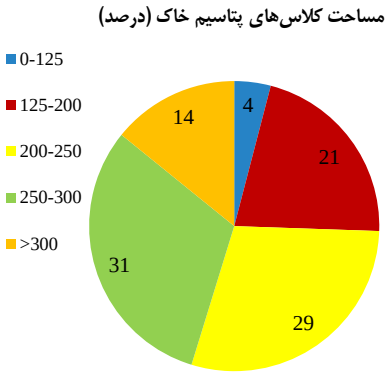
ج


نقشه فسفر قابل دسترس خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
P (mg kg-1)
0-5
5-10
10-15
15-25
>25
0 20 40 80 Km

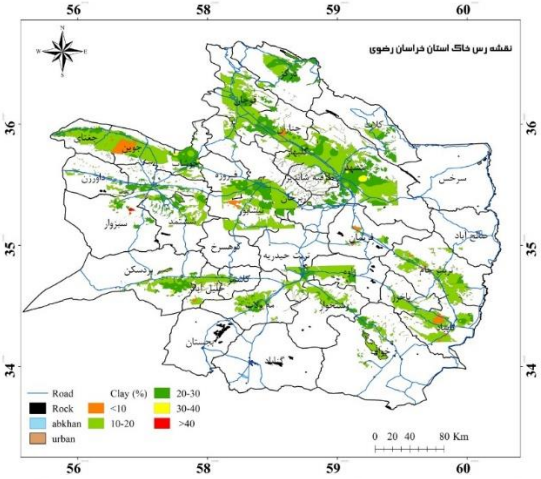

مساحت کلاس های فسفر خاک (درصد)
3/5
2/05
5/98
23/54
64/92
0-5
5-10
10-15
15-25
25-75

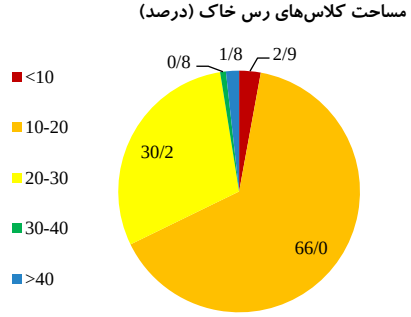
د


نقشه پتاسیم قابل دسترس خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
K (mg kg-1)
0-125
125-200
200-250
250-300
>300
0 20 40 80 Km

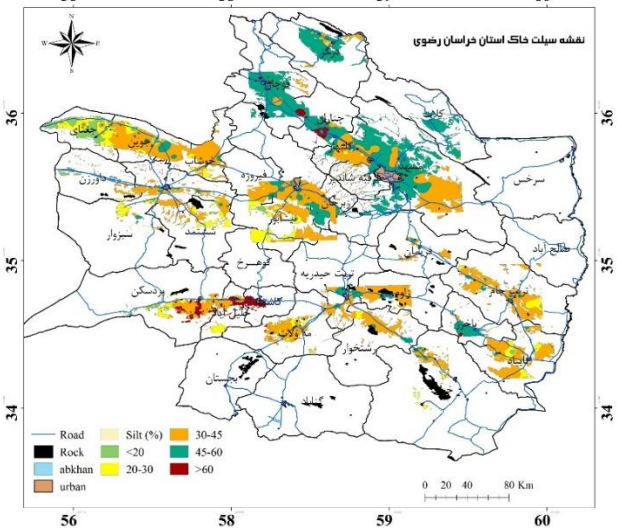

مساحت کلاس‌های پتاسیم خاک (درصد)
0-125
125-200
200-250
250-300
>300
4
21
29
31
14

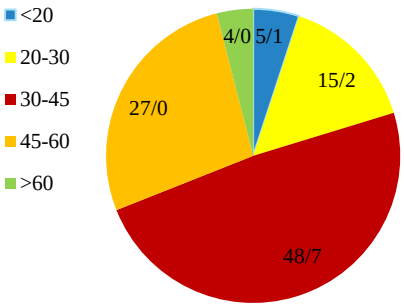
ذ


نقشه رس خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
Clay (%)
<10
10-20
20-30
30-40
>40
0 20 40 80 Km

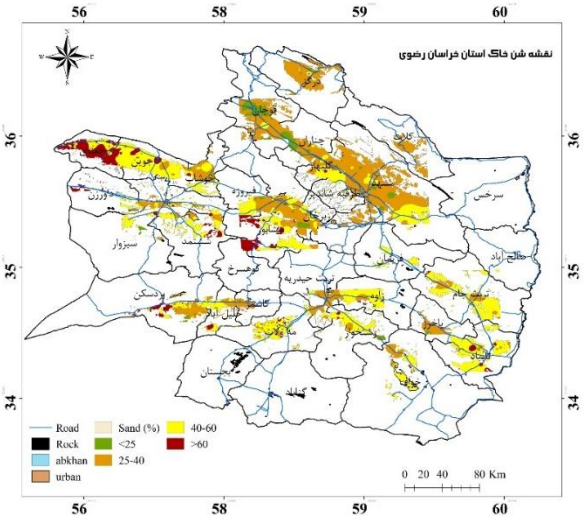

مساحت کلاس‌های رس خاک (درصد)
<10
10-20
20-30
30-40
>40
0/8
1/8
2/9
30/2
66/0

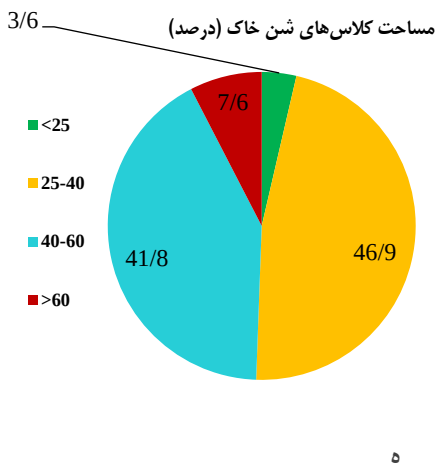
ر


نقشه سیلت خاک استان خراسان رضوی
Road
Rock
abkhan
urban
Silt (%)
<20
20-30
30-45
45-60
>60
0 20 40 80 Km


مساحت کلاس‌های سیلت خاک (درصد)
<20
20-30
30-45
45-60
>60
4/0
5/1
15/2
27/0
48/7

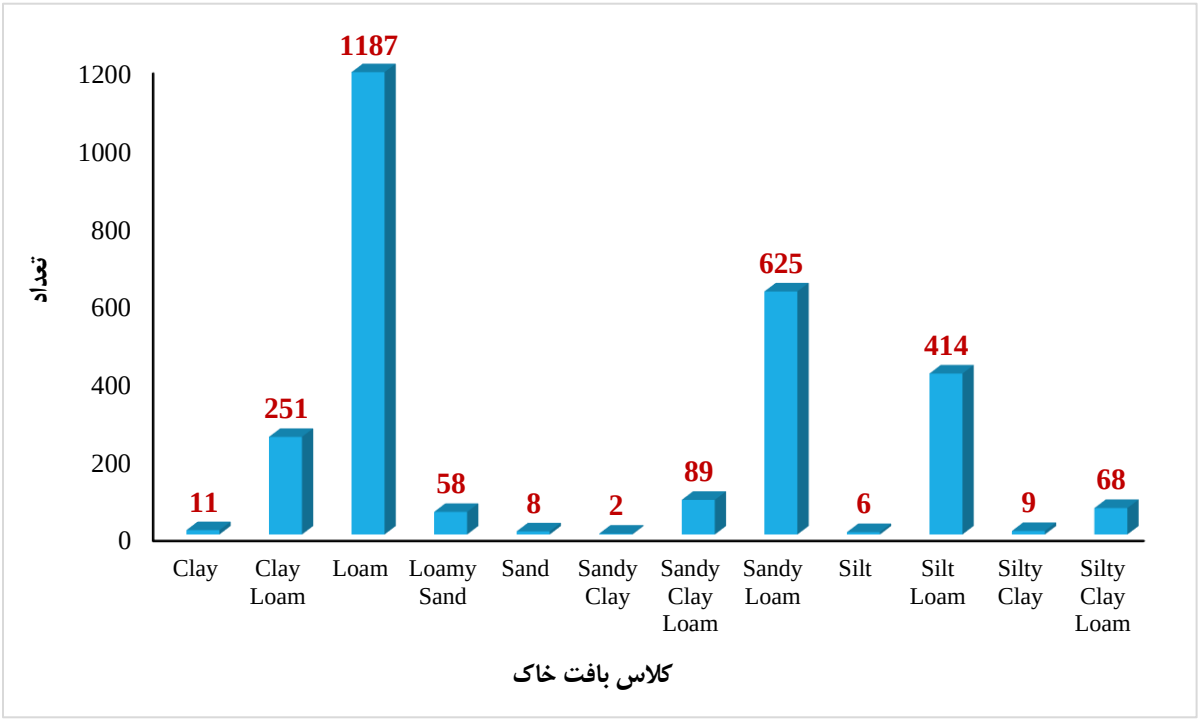
ز





شکل ۵. نقشهٔ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اراضی مطالعاتی در استان خراسان رضوی

نتایج تجزیه‌وتحلیل کلاس‌های بافت خاک در افق سطحی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه نشان داد که به‌طورکلی خاک‌های منطقه در سه کلاس بافتی لوم، لوم شنی و لومی سیلتی قرار دارند (شکل ۶). به‌ترتیب ۱۱۸۷، ۶۲۵ و ۴۱۴ نمونه در این سه کلاس بافت خاک هستند. بنابراین براساس نتایج خلاصه آماری بیشترین مساحت منطقه دارای بافت لومی می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶. توزیع کلاس بافت‌های خاک در نمونه‌های خاک مطالعه‌شده در استان خراسان رضوی

مقادیر ME و RMSE نقشه‌های پهنه‌بندی شده مقدار اریبی را نشان می‌دهند که در حالت ایده‌آل بایستی صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی قابل توجه آن‌ها به ترتیب نشان‌دهندهٔ برآورد بیشتر یا کم‌تر از مقدار واقعی هستند. با توجه به جدول ۴ مقادیر مثبت و منفی ME در روش IDW نشان‌دهندهٔ این است که این روش‌های تخمین به ترتیب مقادیری بیشتر یا کم‌تر از مقدار واقعی را پیش‌بینی کرده‌اند. لازم به ذکر است مدل‌سازی در این مطالعه به‌صورت مجزا برای هریک

از شهرستان‌های استان انجام شده است. به این معنا که ابتدا برای هر شهرستان به‌طور مستقل، با استفاده از داده‌های نمونه‌برداری شده در محدودهٔ همان شهرستان، اقدام به مدل‌سازی و تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک گردید. سپس خروجی‌های حاصل از تمامی شهرستان‌ها در محیط نرم‌افزار GIS به یکدیگر الحاق (Merge) شده و نقشهٔ نهایی استان به‌صورت یکپارچه ارائه شد. با توجه به وسعت بالای استان و پراکندگی نمونه‌ها در سطحی گسترده، انجام مدل‌سازی به‌صورت تفکیک‌شده در سطح شهرستان‌ها، امکان حفظ پیوستگی مکانی داده‌ها را در هر زیرواحد فراهم می‌آورد. این امر سبب می‌شود که تخمین‌ها در هر منطقه بر اساس داده‌های همسایه‌های مکانی نزدیک‌تر انجام شود که دقت بالاتری به همراه دارد. ازآنجاکه شهرستان‌ها اغلب دارای شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و مدیریتی نسبتاً همگن‌تری نسبت به کل استان هستند، مدل‌سازی مجزا برای هریک از آن‌ها می‌تواند تغییرات محلی را بهتر منعکس و از بروز خطاهای ناشی از ناهمگنی شدید داده‌ها در مقیاس استان جلوگیری کند. شایان ذکر است پس از محاسبهٔ خطا برای هر شهرستان، میانگین خطاها محاسبه و به‌عنوان خطای کلی در قالب جدول ۴ به صورت تجمیعی برای استان ارائه گردید.

جدول ۴. معیارهای ارزیابی متقابل برای ویژگی‌های خاک مورد بررسی

پارامتر	ME	RMSE
هدایت الکتریکی	−۰/۰۵۶	۴/۰۵
pH	−۰/۰۰۴	۰/۳۸
کربن آلی	۰/۰۰۰۲	۰/۱۶
رس	۰/۰۶۵	۱۲/۶۰
سیلت	−۰/۳۱	۱۴/۱۲
شن	۰/۰۷	۲۲/۰۳
فسفر قابل جذب	۰/۳۰	۲/۲۱
پتاسیم قابل جذب	۰/۰۰۷	۳/۴۶

براساس آخرین آمار ارائه‌شده توسط سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، مجموع سطح زیر کشت محصولات زراعی و باغی این استان در حدود ۹۹۰ هزار هکتار می‌باشد (Statistics and information of the Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2025). اگر اراضی مطالعه‌شده را نماینده‌ای جامع از وضعیت استان در نظر بگیریم، براساس برآورد و کلاسه‌بندی‌های مختلف می‌توان گفت بیش از نیمی از اراضی زراعی مطالعه‌شدهٔ استان دارای میزان فسفر کم‌تر از ۱۰ میلی بر کیلوگرم خاک می‌باشند. به عبارتی، حدود ۵۶۰ هزار هکتار از اراضی استان از کمبود فسفر رنج می‌برند، نیاز به حدود ۱۰۰–۵۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفاتی دارند. با این آمار و ارقام، میزان کود فسفاتی استان حدود ۴۲ هزار تن برآورد می‌گردد. این در حالی است که طبق آمار استان، در سال زراعی ۱۴۰۲، حدود ۱۰ هزار تن کود فسفاتی (۲۴ درصد مورد نیاز) در استان توزیع شده است. به عبارت ساده‌تر، استان با کمبود ۳۲ هزار تن از این نوع کود مواجه بوده است. بنابراین نیاز هست براساس نتایج پهنه‌بندی تخصیص اولویت کوددهی صورت پذیرد.

در مورد پتاسیم، حدود ۵۰ درصد اراضی زراعی استان، معادل ۴۹۵ هزار هکتار دارای درجات متفاوتی از کمبود پتاسیم می‌باشند. با توجه به اینکه اراضی به‌طور میانگین به حدود ۷۵ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیمی نیاز دارند. بنابراین مجموع کود پتاسیمی مورد نیاز استان، حدود ۳۷ هزار تن برآورد می‌گردد که در مقایسه با ۵ هزار تن کود پتاسیمی توزیع شده در استان، می‌توان گفت در سال زراعی ۱۴۰۲، فقط ۱۳ درصد کود پتاسیمی مورد نیاز استان فراهم شده است.

از نظر میزان ماده آلی و نیاز به کودهای نیتروژنی (اوره)، طبق آمار موجود حدود ۶۸ درصد اراضی معادل تقریبی ۶۷۳ هزار هکتار از خاک‌های کشاورزی استان دارای ماده آلی کم‌تر از ۰/۵ درصد می‌باشند. این اراضی به طور میانگین ۳۰۰–۲۵۰ کیلوگرم کود نیتروژنی در هکتار نیاز دارند. به عبارتی میزان کود نیتروژنی استان حدود ۱۵۰ هزار تن برآورد می‌شود که طبق آمار سازمان جهاد کشاورزی استان تقریباً همین مقدار نیز (۱۵۴ هزار تن) در استان توزیع شده است.

نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که جمع‌آوری داده‌های طولانی‌مدت و با کیفیت بالا از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک در استان خراسان رضوی می‌توان امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر در زمینهٔ توزیع نهاده و یا توصیه‌های کودی را فراهم کرد. با تشکیل و طراحی و توسعهٔ نرم‌افزارهای مدیریت خاک و پایگاه داده خاک با توجه به شرایط اقلیمی و کشاورزی خراسان رضوی می‌توان اطلاعات جامع و کاربردی را در اختیار کشاورزان و مدیران قرار داد. چنین ابزاری می‌تواند به کشاورزان و کارشناسان کمک کند تا با سرعت بیشتر، مشکلات خاک را شناسایی و برنامه‌های اصلاحی متناسب را اجرا کنند. علاوه بر این، با ارائهٔ راهکارهای بهینه برای تغذیه و آبیاری، موجب کاهش مصرف کود و آب نمود. مطالعات نشان می‌دهد که کشاورزانی از توصیه‌های مبتنی بر آزمون خاک استفاده می‌کنند، تا ۳۵٪ در مصرف کود صرفه‌جویی می‌کنند (FAO, 2021) این کاهش نه‌تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد بلکه نقش مهمی در حفظ منابع طبیعی و بهبود پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی ایفا می‌کند. استفادهٔ بهینه از منابع آب و کود می‌تواند اثرات زیست‌محیطی مخرب مانند آلودگی آب‌های زیرزمینی و کاهش حاصل‌خیزی خاک را به حداقل برساند. از دیدگاه مدیریتی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از داده و دانش خبره می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد در بهبود تصمیم‌گیری‌های کشاورزی ایفای نقش کنند. این ابزارها قادرند با تحلیل داده‌های گسترده و پیچیدهٔ خاک، توصیه‌های عملی

و علمی ارائه دهند که منجر به افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و حفظ محیط زیست می‌شود. همچنین، پیش‌بینی‌های دقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران در تدوین برنامه‌های کشاورزی پایدار و بهینه‌سازی استفاده از منابع خاک و آب کمک کند.

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از داده‌های خاک مکانی موجود در آزمایشگاه‌های استان خراسان رضوی، نقش کلیدی در تحقق کشاورزی دقیق دارد. راهکار پیشنهادی تجمیع داده‌ها در یک سامانهٔ یکپارچه، امکان ارائهٔ توصیه‌های کودی اختصاصی را فراهم می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که ادغام روش‌های زمین‌آماری با فناوری‌های دیجیتال، مسیر دست‌یابی به پایداری منابع خاک و آب را هموار می‌سازد. یافته‌ها تأیید می‌کنند که ناهمگونی خاک در استان خراسان رضوی به حدی است که توصیه‌های کودی یکسان برای کل منطقه، بی‌فایده است. برای مثال، در مناطق شمالی با کربن آلی بالاتر، کاهش مصرف کود نیتروژن و افزایش کودهای گوگردی پیشنهاد می‌شود، درحالی‌که جنوب و مرکزی استان نیازمند برنامه‌های اصلاح شوری و افزودن فسفر است. استفاده از داده‌های خاک مکانی بومی در تصمیم‌سازی کشاورزی دقیق، نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری و پایداری کشاورزی در استان خراسان رضوی دارد. این داده‌ها به کشاورزان کمک می‌کنند تا با مدیریت بهینهٔ منابع، عملکرد محصولات را افزایش و اثرات منفی زیست‌محیطی را کاهش دهند. با توجه به تنوع خاک‌ها و شرایط اقلیمی در استان، استفاده از این داده‌ها ضروری است.

با وجود مزایای فراوان، استفاده از داده‌های خاک با چالش‌هایی نیز همراه است. ازجملهٔ این چالش‌ها می‌توان به هزینه‌های بالای جمع‌آوری داده‌ها، نیاز به تخصص فنی و دسترسی محدود به فناوری‌های پیشرفته در مناطق محروم اشاره کرد. برای غلبه بر این چالش‌ها، دولت و سازمان‌های ذی‌ربط می‌توانند با سرمایه‌گذاری در آموزش کشاورزان، توسعهٔ زیرساخت‌ها و ارائهٔ خدمات مشاوره‌ای، استفاده از داده‌های خاک را تسهیل کنند. راهکار پیشنهادی مبتنی بر ایجاد یک اکوسیستم داده‌ای خاک است که در آن، آزمایشگاه‌ها، کشاورزان و مراکز تحقیقاتی در به‌روزرسانی و استفاده از داده‌ها مشارکت می‌کنند. گام بعدی، اجرای پایلوت این سامانه در شهرستان مشهد و آموزش کشاورزان برای استفاده از فناوری‌های مرتبط است. همچنین، ادغام داده‌های اقلیمی و مدیریتی می‌تواند کارایی مدل‌ها را افزایش دهد و به توسعهٔ مدل‌های ترکیبی پیشرفته‌تر منجر شود. مطالعات آینده باید به سمت توسعهٔ مدل‌های چندمنظوره با قابلیت‌های بالاتر و استفاده از داده‌های بلندمدت حرکت کند تا امکان کاربرد گسترده‌تر و دقیق‌تر این فناوری‌ها فراهم شود. پیشنهاد می‌شود برای انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، ضروری است در آزمایشگاه‌های خاک‌شناسی هر استان، سامانه یا پایگاهی یکپارچه برای ثبت داده‌ها و نتایج حاصل از آنالیزها مستقر گردد. این سامانه امکان ذخیره‌سازی نظام‌مند اطلاعات را فراهم آورده و بستری مناسب برای یکپارچه‌سازی داده‌های خاک استان ایجاد می‌کند. بهره‌گیری از این داده‌ها در بخش‌های سازمانی و دولتی می‌تواند در راستای مدیریت بهینهٔ الگوی کشت، ارائهٔ توصیه‌های کودی دقیق و سایر اقدامات راهبردی در حوزهٔ کشاورزی و منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

حامی مالی

بنا به اظهار نویسندهٔ مسؤول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندهٔ اول: ۷۰ درصد، نویسندهٔ دوم: ۳۰ درصد.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان، از سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی به دلیل مشاوره و راهنمایی علمی و مشارکتشان در جهت جمع‌آوری داده‌های این مقاله تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

Archana, K., Prabhakar Reddy, T., Anjaiah, T., and Padmaja, B., (2016), Effect of dose and time of application of phosphorous on yield and economics of rice grown on P accumulated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5): 3309-3319

Banaei, M. H. (2002). Map of Iran's soil resources and potential. Retrieved from Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran, 6 pages. (In Persian).

Bouma, J., Montanarella, L., & Evanylo, G. (2019). The challenge for the soil science community to contribute to the implementation of the UN Sustainable Development Goals. *Soil Use Manage*, 1–9.

Brown, J., & Wilson, K. (2021). Application of artificial intelligence for soil salinity prediction and management in Australian agriculture. *Agricultural Systems*, 190, 103084.

Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465.

FAO. (2021). Guidelines for Soil Analysis and Fertilizer Recommendation. Rome.

Fathi, R., Asodar, M., Ghaseminejad Rainin, D. (2020). An overview of the conservation agriculture situation in the world with a focus on one of the successful countries. *Scientific Journal of Land Management*, 9(1):101-87.

Goovaerts, P. (2022). Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press.

Hosseinzadeh, S., Fateh, E., Aynehband, A., Farzaneh, M., Habibi Asl, J. (2025). The effect of Different Tillage Methods and Application of Plant Residues on Yield and Growth Characteristics of triticale (X Triticosecale Wittmack). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 34 (4): 379-396. *(*In persion)

Kumar, S., Patel, R., & Singh, A. (2023). Smart governance in agriculture: Challenges and opportunities in India. *Agricultural Systems*, 203, 103456.

Lal, R. (2020). Soil organic matter and sustainability: Key to soil quality. Advances in Agronomy, 164, 111-150.

Lindsay, W. L., & Schwab, A. P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5:4-7, 821-840

Lynch, J. P. (2018). Rightsizing root phenotypes for drought resistance. Journal of Experimental Botany, 69(13), 3279-3292.

Maleki, S., Khormali, F., Mohammadi, J., Bogaert, P., & Bodaghabadi, M.B. (2020). Effect of the accuracy of topographic data on improving digital soil mapping predictions with limited soil data: An application to the Iranian loess plateau. *Catena*, 195, 104810.

Maleki, S., Zeraatpisheh, M., Karimi, A., Sareban, G., & Wang, L. (2022). Assessing Variation of Soil Quality in Agroecosystem in an Arid Environment Using Digital Soil Mapping. *Agronomy*, 12, 578.

Mousavi, A., Karimi, A.R., Maleki, S., Safari, T., & Taghizadeh-Mehrjardi, T. (2023). Digital mapping of selected soil properties using machine learning and geostatistical techniques in Mashhad plain, northeastern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 82, 234.

Olsen, SR, & Sommers, LE. (1982). Phosphorus. In: Page AL, et al (eds), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, 2nd edn, Agron Monogr 9. ASA and ASSA, Madison WI, pp403–430.

Page, A.L., Miller, R.H. & Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis.* Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. In Soil Science Society of America, 1159. soils. J. Soil Sci. Soc. Am. 51: 1460-1465.

Tomczyk, P., Wdowczyk, A., Wiatkowsk, B., Szyma´nska-Pulikowsk, A., Kuriqi, A. (2024). Fertility and quality of arable soils in Poland: spatial–temporal analysis of long-term monitoring. *Ecological Indicators*, 166, 112375.

Reports on the status of soils in Khorasan Razavi. (2023). *Agricultural Jihad Organization of Khorasan Razavi, water and soil management and technical and engineering affairs*. www.koaj.ir (In Persian)

Rodrigo-Comino, J., M. López-Vicente, V., Kumar, A., Rodrígue, Seijo, O., Valkó, C., & P. Panagos, R. (2020). Soil science challenges in a new era: a transdisciplinary overview of relevant topics. *Air, Soil Water Research*, 13, 1178622120977491.

Singh, A.L., Singh, P.K., Latha, P. (1988). Effect of split application of phosphorous on the growth of azolla and low land rice. *Fertility Research*, 16: 2. 109-117.

Shukla, K., Kumar, P., Mann, G.S. & Khare, M., (2020). Mapping spatial distribution of particulate matter using Kriging and Inverse Distance Weighting at supersites of megacity Delhi. *Sustain. Cities Soc*, 54, 101997

Soil Survey Staff. (1996). *Soil survey laboratory methods manual*. Report No. 42, USDA, NRCS, NCSS.

Song, Z. & Wei, J. (2022). Estimation of soil organic carbon stock and its controlling factors in cropland of Yunnan Province, China. *Journal Integrative Agriculture*, 21, 1475–1487.

Statistics and information of the Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization. (2025). www.koaj.ir (In Persian)

Tunçay, T., Dedeoglu, M., Dengiz, O., Baskan, O., Kilic, S, & Ilhami Bayramin, I. (2021). Assessing soil fertility index based on remote sensing and gis techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 190, 104525.

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 journal*, 37, 29-38.

Wang, L., Xu, J., & Zhao, Y. (2023). Smart agriculture policy development through AI-based soil data analytics. *Environmental Science and Policy*, 144, 104689.

Webster, R., & Oliver, M. A. (2019). Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons.

Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson Education.

Vullaganti, N., G. Ram, B., & Sun, X. (2025). Precision agriculture technologies for soil site-specific nutrient management: A comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 15, 147-161.

Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S., & Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*, 338, 445–452.