



Uncertainty and Spatial mapping of soil salinity and sodicity using machine learning methods in three different management depths in Abyek region

Azam Jafari¹ | Fereydoon Sarmadian^{2✉} | Zahra Rasaei³

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail:

a.jafari@uk.ac.ir

2. Corresponding Author, Soil Science Department, Faculty of Agricultural, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fsarmad@ut.ac.ir

3. Soil Science Department, Faculty of Agricultural, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: zahra.rasaei@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 25, 2024

Revised: Nov. 7, 2024

Accepted: Jan. 1, 2025

Published online: May. 2025

Keywords:

Spatial Distribution,
Salinity And Alkalinity,
Bootstrapping,
Digital Soil Mapping.

ABSTRACT

Soil salinity and sodicity are affecting soils in arid and semi-arid regions, reducing soil fertility and leading to land degradation, posing threats to the sustainable development of resources. Creating maps of these soil variables throughout soil profile is crucial for effective land management. This study aims to investigate the spatial variability of soil salinity and sodicity in a part of the arid and semi-arid region of Abyek. Three critical depths for the cultivation of important agricultural products (0-50, 0-100, and 0-150 cm) were examined. The models were conducted using 281 soil data and environmental covariates. The modeling and prediction of soil electrical conductivity (salinity) and sodium absorption ratio (sodicity) were performed using four machine learning models: Cubist, random forest, artificial neural network, and XGBoost. The final maps were derived from a simple weighted ensemble model. The model uncertainty was assessed using bootstrapping with 50 repetitions. The results indicated high spatial variability of EC and SAR (exceeding 35%), with an increase from north to south of the region and from surface to deeper soil layers. Results showed that topography, climate, and vegetation are primary controlling factors of spatial distribution of soil salinity and alkalinity. R^2 for the final models predicting both EC and SAR across all three depths ranged from 0.61 to 0.81, demonstrating the models' high efficiency, increasing with depth. The highest level of model uncertainty was observed in the southern parts of the region with high variability in EC and SAR values in short distances, fewer soil observations, and less topography, which was lower for models predicting sodium content at all depths compared to salinity. More than 65% of the area was non-saline, while non-alkaline areas covered 70% of it. Acquiring these maps represents a significant step towards improving land management practices based on the land's potential.

Cite this article: Jafari, A., Sarmadian, F., & Rasaei, Z., (2025) Uncertainty and Spatial mapping of soil salinity and sodicity using machine learning methods in three different management depths in Abyek region, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 607-629. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.382783.669797>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.382783.669797>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil salinity and sodicity are critical environmental issues that pose significant challenges to sustainable agricultural development and global food security. These phenomena represent the primary soil degradation processes in arid and semi-arid regions, which encompass approximately 20% of Iran's land and are expanding at an increasing rate. Creating maps of these soil variables throughout soil profile is crucial for effective land management. Digital Soil Mapping (DSM) is a powerful tool in this context and has been globally employed to predict the spatial distribution of soil salinity and sodicity. Given the vertical variations of these characteristics along the soil profile due to the accumulation of salts at different depths and their impact on the growth of plant species with superficial, semi-deep, and deep roots, this study aims to investigate the changes in salinity and sodicity of soils in the arid and semi-arid region of Abyek at three management depths: 0-50 cm, 0-100 cm, and 0-150 cm.

Materials and Methods

To achieve the objectives of this study, electrical conductivity (EC) and sodium absorption ratio (SAR) data from different layers of 281 soil profiles were utilized to model and predict soil salinity and sodicity, respectively. The values of these two properties were averaged using vertical weighted interpolation functions at three depths: 0-50 cm, 0-100 cm, and 0-150 cm. Considering the conditions of the study area and based on expert opinion, nine environmental covariates with a spatial resolution of 12.5 meters were used as representatives of the scorpan factors for modeling and spatial prediction of these two soil properties. The modeling was conducted using different machine learning (ML) models including cubist, random forest, artificial neural network, gradient boosting, and their simple weighted combination. The models were evaluated using common indicators, including the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and Lin's concordance correlation coefficient (LCCC), and their uncertainty was assessed based on the bootstrapping method with 50 replicates.

Results and Discussion

The results indicated high spatial variability of EC and SAR (exceeding 35%), with an increase from north to south of the region and from surface to deeper soil layers. This can be attributed to the substantial variations in climate, soil characteristics, and differing management practices. Additionally, the investigations showed that topography, climate, and vegetation are primary controlling factors of spatial distribution of soil salinity and alkalinity. R^2 for the final models predicting both EC and SAR across all three depths ranged from 0.61 to 0.81, demonstrating the models' high efficiency, increasing with depth. The highest level of model uncertainty was observed in the southern parts of the region with high variability in EC and SAR values in short distances, fewer soil observations, and less topography, which was lower for models predicting sodium content at all depths compared to salinity. More than 65% of the area was non-saline, while non-alkaline areas covered 70% of it.

Conclusion

In general, the findings of this study validate the use of digital soil mapping methods, particularly the combination of different models, as an effective approach for creating accurate maps of soil salinity and sodicity in the arid and semi-arid regions of Abyek. Acquiring these maps represents a significant step towards improving land management practices based on the land's potential. The results, presented as soil salinity and sodicity maps along with their uncertainty maps can serve as valuable guides for managers, soil and water experts, and land users in future land use planning. Additionally, this information can be utilized for soil conservation, especially in the southern parts of the region. Finally, the method employed in this study can be applied to other arid and semi-arid regions of the country that face issues of soil salinization and alkalization.

Author Contributions

Conceptualization, A.J., F.S. and Z.R.; methodology, A.J., and Z.R.; software, A.J.; validation, A.J., and Z.R.; formal analysis, A.J.; investigation, A.J., F.S. and Z.R.; resources, A.J. and F.S.; data curation, F.S.; writing—original draft preparation, A.J.; writing—review and editing, A.J., F.S. and Z.R.; visualization, A.J., F.S. and Z.R.; supervision, F.S.; project administration, F.S.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to thank the University of Tehran for support of the present study.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

عدم قطعیت و نقشه‌برداری مکانی شوری و قلیا بودن خاک با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در سه عمق مدیریتی مختلف در منطقه آبیک

اعظم جعفری^۱ | فریدون سرمیدیان^۲ | زهرا رسائی^۳^۱ گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: a.jafari@uk.ac.ir^۲ نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fsarmad@ut.ac.ir^۳ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: zahra.rasaei@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	شور و سدیمی شدن خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای مخرب خاک مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. این دو عارضه می‌توانند علاوه بر کاهش میزان باروری خاک‌ها، این اراضی را مستعد تخریب کرده و تهدیدی جدی برای توسعه پایدار منابع باشند. تهیه نقشه‌های پراکنش این ویژگی‌ها در طول خاک‌رخ می‌تواند به مدیریت بهتر این اراضی کمک کند. مطالعه حاضر با هدف بررسی تغییرات شور و سدیمی بودن خاک‌های منطقه خشک و نیمه‌خشک آبیک قزوین اجرا شده است. به منظور آگاهی از نحوه پراکنش سطحی و عمقی این دو ویژگی، سه عمق مهم از نظر کشت محصولات کشاورزی شامل ۵۰-۰، ۱۰۰-۰ و ۱۵۰-۰ سانتی‌متر بررسی شدند. مدل‌سازی‌ها بر اساس اطلاعات ۲۸۱ خاک‌رخ و متغیرهای کمکی محیطی با دقت مکانی ۱۲/۵ متر انجام شدند. مدل‌سازی و پیش‌بینی مقادیر هدایت الکتریکی (شوری) و نسبت جذب سدیم (قلیا بودن) بر اساس چهار مدل تعلیم ماشین کوبیست، جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و گرادیان بوستینگ صورت گرفت که مدل ترکیبی وزن‌دار ساده ترکیب این مدل‌ها به عنوان نقشه‌های نهایی شوری و سدیمی بودن در نظر گرفته شدند. عدم قطعیت مدل از روش بوت‌استرپینگ با ۵۰ تکرار بدست آمد. نتایج نشان داد که پستی و بلندی، اقلیم و پوشش گیاهی اصلی‌ترین عوامل کنترل‌کننده شوری و قلیا بودن در منطقه می‌باشند. مقدار ضریب تبیین مدل‌های نهایی پیش‌بینی شوری و سدیمی در هر سه عمق مورد بررسی در محدوده ۰/۶۱ تا ۰/۸۱ بوده و بیانگر کارایی خوب مدل‌ها می‌باشد. بیشترین میزان عدم قطعیت مدل‌ها در قسمت‌های جنوبی منطقه با تغییرات زیاد مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در فاصله کم، تعداد کمتر مشاهدات خاک، توپوگرافی کم‌تر مشاهده شد که این مقدار برای مدل‌های پیش‌بینی‌کننده سدیمی بودن در تمامی عمق‌ها نسبت به شوری کم‌تر بود. کارایی مدل‌ها برای هر دو ویژگی با افزایش عمق افزایش یافته است. بیش از ۶۵٪ منطقه بصورت غیر شور می‌باشد درحالی‌که مناطق بدون قلیا ۷۰٪ منطقه را پوشش می‌دهند. دستیابی به این نقشه‌ها گامی موثر در بهبود مدیریت بهره‌برداری از اراضی مطابق با استعدادهای آن‌ها می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۷/۴	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۸/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲	
تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی:	
توزیع مکانی،	
شوری و قلیا بودن،	
بوت‌استرپینگ،	
نقشه‌برداری رقومی خاک.	

استناد: جعفری، اعظم، سرمیدیان، فریدون، رسائی، زهرا، (۱۴۰۴) عدم قطعیت و نقشه‌برداری مکانی شوری و قلیا بودن خاک با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در سه عمق مدیریتی مختلف در منطقه آبیک، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۲)، ۶۰۷-۶۰۲۹



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.382783.669797>DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.382783.669797>

مقدمه

شوری و قلیایی شدن خاک یک مسئله مهم زیست محیطی است که چالش‌های مهمی را برای توسعه پایدار کشاورزی و امنیت غذایی در سراسر جهان ایجاد می‌کند (Sultan et al., 2023; Mukhopadhyay et al., 2021; Nabiollahi et al., 2021). بنابراین ارزیابی دقیق آن‌ها برای تعیین راه‌های مناسب برای مقابله با تخریب اراضی، مدیریت بهتر خاک و محصول ضروری است.

مناطق خشک و نیمه‌خشک عمدتاً با خاک‌های شور مشخص می‌شوند که تقریباً ۹۰ درصد ایران را پوشش می‌دهند (Qadir et al., 2008). شوری و سدیمی شدن خاک به طور قابل توجهی کشاورزی در این مناطق را تهدید می‌کند که با تخریب زمین منجر به کاهش عملکرد محصول می‌شود. همچنین محتوای بالای یون سدیم در خاک باعث پراکندگی اجزای خاک و تسریع در تخریب و فرسایش خاکدانه‌ها می‌شود. قلیایی بودن خاک می‌تواند باعث کمبود مواد مغذی و اثرات سمی شود و از عمق ریشه‌زایی جلوگیری کند که می‌تواند تأثیر مخربی بر تولید محصول داشته باشد. انتقال از آبیاری غرقابی به آبیاری قطره‌ای، خشکسالی‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی (کاهش بارندگی، افزایش دما، افزایش تبخیر و تعرق)، فشارهای انسانی بر منابع و مدیریت نادرست اراضی از جمله افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی و آبیاری اراضی با آب‌های شور و همچنین ویژگی‌های خاکی و ذاتی خاک‌ها از جمله مواد مادری آن‌ها انباشت نمک خاک را تشدید می‌کند (Wang et al., 2024; Roozitalab et al., 2018; Fathizad et al., 2020; Nabiollahi et al., 2021)، که با یک نرخ افزایشی حدود ۲۰ درصد از اراضی ایران را در بر می‌گیرند (Shahrayini and Noroozi, 2021).

خاک‌های شور با هدایت الکتریکی (EC) بالای ۴ دسی زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم (SAR) کمتر از ۱۳ شناخته می‌شوند. در حالی که خاک‌های قلیایی دارای هدایت الکتریکی کمتر از ۴ دسی زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم بالای ۱۳ می‌باشند (Richards, 1954). طبق طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط فائو و سازمان نقشه‌برداری آمریکا، خاک‌ها از نظر شوری در پنج کلاس غیر شور (هدایت الکتریکی کمتر از ۲ دسی زیمنس بر متر)، شوری ناچیز (هدایت الکتریکی ۲ تا ۴ دسی زیمنس بر متر)، کمی شور (هدایت الکتریکی ۴ تا ۸ دسی زیمنس بر متر)، شوری متوسط (هدایت الکتریکی ۸ تا ۱۶ دسی زیمنس بر متر) و خیلی شور (هدایت الکتریکی بیشتر از ۱۶ دسی زیمنس بر متر) قرار می‌گیرند. این در حالی است که خاک‌های با نسبت جذب سدیم بالاتر از ۱۳ به عنوان خاک‌های قلیا در نظر گرفته می‌شوند. خاک‌ها از نظر میزان نسبت جذب سدیم در ۴ کلاس غیر سدیمی (نسبت جذب سدیم کمتر از ۵)، سدیمی (نسبت جذب سدیم بین ۵ تا ۱۳)، قلیا (نسبت جذب سدیم بین ۱۳-۲۰) و بسیار قلیا (نسبت جذب سدیم بیشتر از ۲۰) قرار دارند (FAO, 2023; Soil Survey Manual, 2018; Soil Survey Staff, 2022; Soil Survey Staff, 2017).

مطالعه و تهیه نقشه‌های دقیق خاک‌های متأثر از نمک می‌تواند در کاهش تخریب خاک و آگاهی از فرآیندها و عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مورد مطالعه و در نتیجه بهبود مدیریت آن‌ها کمک کند (Wang et al., 2021; Naimi et al., 2021). نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) به عنوان یک ابزار قدرتمند برای پیش‌بینی توزیع مکانی ویژگی‌ها و کلاس‌های خاک کارایی بالایی دارد (Adeniyi et al., 2024). شوری خاک به دلیل نقش حیاتی آن در محیط زیست، توجه قابل زیادی را از سوی محققان خاک‌شناس به خود جلب کرده است که منجر به افزایش علاقه به استفاده از روش‌های DSM برای مطالعه آن شده است. در این راستا، اطلاعات محیطی بدست آمده از مجموعه متنوعی از منابع مانند مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، داده‌های سنجش از دور (RS) و پارامترهای اقلیمی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی شوری و قلیا بودن خاک در سراسر دنیا و ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بنابر یافته‌های Wang et al. (2024)، فاکتورهای پستی و بلندی، اقلیم، پوشش گیاهی، شاخص شوری و خصوصیات خاک از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل کننده شوری خاک می‌باشند که در مدل‌سازی این ویژگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. (Shahrayini and Noroozi, 2021) نیز بیان داشتند که ترکیبی از فاکتورهای پستی و بلندی و شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای در توصیف و مدل‌سازی شوری خاک مؤثر هستند. Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2014) و موسوی و همکاران (۱۴۰۰) متغیرهای محیطی متفاوتی را برای توصیف تغییرات و مدل‌سازی شوری خاک مورد استفاده قرار دادند که بر اهمیت متغیرهای سنجش از دور در مدل‌سازی شوری خاک سطحی تأکید کردند.

بررسی‌ها همچنین بیانگر کاربرد طیف گسترده‌ای از مدل‌های یادگیری ماشین برای توصیف، مدل‌سازی و پیش‌بینی روند تغییرات شوری خاک در سرتاسر جهان و ایران می‌باشند. از میان مطالعات انجام شده برای نقشه‌برداری رقومی شوری خاک در ایران می‌توان به مطالعه Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2014) اشاره کرد. ایشان با استفاده از مدل درخت رگرسیون، نقشه شوری خاک منطقه‌ای در یزد را در عمق‌های مختلف ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری تهیه کردند. موسوی و همکاران (۱۴۰۰) نیز با در نظر گرفتن پنج عمق استاندارد (۰-۵، ۵-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری) نقشه‌های توزیع شوری خاک با بهره‌گیری از چهار مدل درخت

رگرسیون، کوبیست، نزدیک‌ترین همسایه و جنگل تصادفی در منطقه آبیک قزوین را تهیه کردند. (Aksoy et al. (2024) با بکارگیری مدل‌های جنگل تصادفی و گرادیان بوستینگ (XGBoost) نقشه شوری خاک‌های اطراف دریاچه ارومیه را برای خاک سطحی در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر تهیه کردند. (Omran et al. (2021) مدل‌های درخت رگرسیون، کوبیست و جنگل تصادفی را برای بررسی، مدل‌سازی و پیش‌بینی شوری خاک سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متر) در اطراف دریاچه ارومیه بکار بردند. (Habibi et al. (2021) از مدل شبکه عصبی مصنوعی برای مطالعه و بررسی شوری خاک سطحی عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر در قم استفاده کردند. (Naimi et al. (2021) ضمن بکارگیری مدل‌های مختلف از جمله رگرسیون حداقل مربعات، شبکه عصبی مصنوعی، نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی شوری خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) در بخشی از استان فارس دریافتند که استفاده از مدل ترکیبی (ensemble) به نتایج بهتری در ارائه نقشه‌های شوری خاک منجر گردید.

علی‌رغم اهمیت زیاد قلیا بودن خاک و لزوم دسترسی به نقشه‌های با دقت مناسب برای برنامه‌ریزی مدیریت این اراضی، مطالعات اندکی به مدل‌سازی و پیش‌بینی این شاخص با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری رقومی پرداخته‌اند. (Nabiollahi et al. (2021) در مطالعاتی با استفاده از مدل جنگل تصادفی به بررسی شوری و قلیا بودن خاک‌های سطحی عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر بخشی از استان کردستان پرداختند. همچنین، (Shahrayini and Noroozi (2021) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به کمک مدل‌های رگرسیون و جنگل تصادفی شوری و قلیا بودن خاک سطحی (۱۵-۰ سانتی‌متر) را در بخشی از استان ایلام مورد مطالعه قرار دادند. رسولی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای در راستای نقشه‌برداری رقومی خاک برای تعیین نقشه شاخص کیفیت خاک سطحی در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر، نقشه‌های شوری و قلیا بودن خاک قسمتی از استان کردستان را تهیه کردند. دائم پناه و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از روش‌های دورسنجی و زمین‌آمار اقدام به تهیه نقشه پراکنش شوری و سدیمی بودن خاک بخش‌هایی از استان خراسان نمودند و بر اهمیت شاخص‌های شوری در درک رفتار و تغییرات این دو ویژگی خاک تاکید کردند. (Yu et al. (2018) با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی نقشه پراکنش کلاس‌های شوری و سدیمی بودن خاک‌های سطحی (۵-۰ سانتی‌متری) منطقه‌ای در چین را تهیه کردند. (Liu et al. (2024) با استفاده از مدل‌های مختلف به تهیه نقشه پراکنش شوری و سدیمی بودن در خاک‌های متاثر از نمک در بخش‌هایی از آسیا اقدام کردند که عوامل اقلیمی (بارش سالانه و حداکثر دما)، توپوگرافی (مدل ارتفاعی و شیب)، و شاخص شوری را به عنوان عوامل اصلی برای رخداد این پدیده در مناطق مورد بررسی بیان کردند.

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، اکثر مطالعات انجام شده به تهیه نقشه‌های شوری و قلیایی بودن خاک‌ها در عمق سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) پرداخته‌اند. این در حالی است که این دو ویژگی خاک در طول خاک‌رخ بصورت عمودی تغییر می‌کنند و تجمع نمک‌ها ممکن است در اعماق مختلف خاک‌رخ صورت گیرد. به طوری که ۳ درصد از خاک‌های جهان در لایه‌های بالایی و ۶ درصد در لایه‌های پایین تحت تأثیر شوری قرار می‌گیرند (FAO, 2023). همچنین، حساسیت گیاهان مختلف به درصد بالای نمک‌ها و املاح محلول در عمق‌های مختلف خاک متفاوت می‌باشد و عمقی که در آن میزان تجمع نمک‌ها به حد محدود کنندگی رسیده باشد، اطلاعات مهمی برای مدیران اراضی در بر دارد.

با توجه به روند رو به افزایش شوری و قلیا بودن خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور و لزوم دسترسی به نقشه‌های با دقت بالا برای مدیریت بهتر این اراضی، مطالعه حاضر با هدف بررسی، مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های پراکنش این دو ویژگی مهم خاک در قسمتی از دشت قزوین (منطقه آبیک) اجرا می‌شود. منطقه مورد نظر شامل هر دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک با واحدهای فیزیوگرافی مختلف می‌باشد که تنوعی از خاک‌های شور و قلیا را در بر دارد. با توجه به سهم مهم منطقه در تامین تولیدات کشاورزی و غذای منطقه، مدیریت بهینه اراضی با در نظر گرفتن بهترین نقشه‌های پراکنش مناطق با شوری و قلیا بالا اهمیت بسزایی دارد. در این راستا، از بهترین ترکیب چند روش مدل‌سازی با توجه به ارتباط بین ویژگی‌های خاک و متغیرهای محیطی مهم در قالب نقشه‌برداری رقومی خاک برای تهیه نقشه‌های پراکنش این دو ویژگی خاک در سه عمق مهم خاک برای انواع تولیدات و محصولات کشاورزی شامل ۵۰-۰، ۱۰۰-۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری بهره خواهیم جست.

مواد و روش‌ها

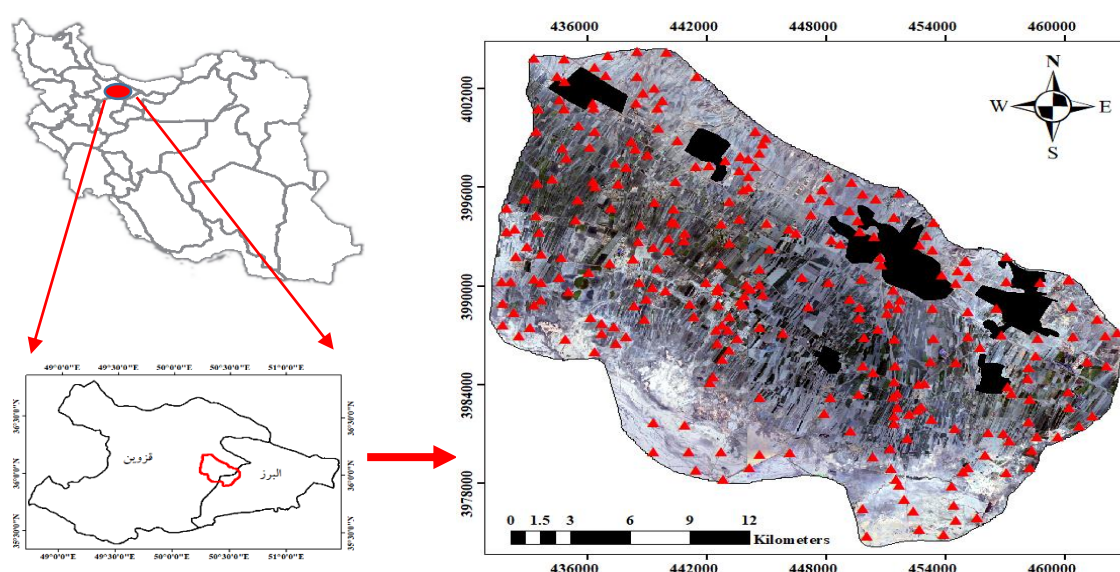
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۵۷۰۰۰ هکتار در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی قرار دارد. شکل ۱ موقعیت قرارگیری منطقه مورد مطالعه در

قسمتی از منطقه آبیک واقع در بین دو استان البرز و قزوین را نشان می‌دهد. پستی و بلندی در منطقه از قسمت‌های شمالی با ارتفاع ۱۷۵۲ متر تا قسمت‌های جنوبی با ارتفاع تقریبی ۱۱۴۱ متر تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. بطوری‌که منجر به تشکیل واحدهای فیزیوگرافی تپه، فلات، دشت دامنه‌ای و اراضی پست (به ترتیب از شمال به جنوب) گردیده است. با این حال، منطقه از نظر شیب تقریباً مسطح می‌باشد بطوری‌که شیب از قسمت‌های بالادست (تپه و فلات) به سمت قسمت‌های جنوبی (دشت و اراضی پست) از ۸ درصد به ۵ درصد تغییر می‌کند.

با تغییر ارتفاع از شمال به جنوب منطقه، میانگین دمای سالانه از ۱۳/۳ تا ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارندگی از ۳۱۴/۲ به ۲۵۳/۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، منطقه بر اساس طبقه‌بندی کوپن دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. رژیم حرارتی خاک ترمیک و رژیم رطوبتی بصورت ترکیبی از سه رژیم زیریک خشک، اریدیک ضعیف و اکوتیک می‌باشد (Soil Survey Staff, 2022) که در قسمت‌های مختلف منطقه پراکنده می‌باشند، بطوری‌که با توجه به تغییرات بارندگی و دما از شمال به جنوب رژیم رطوبتی از زیریک خشک (قسمت‌های شمالی) به اریدیک ضعیف در قسمت‌های جنوبی تغییر می‌کند و رژیم رطوبتی اکوتیک به خاک‌های واقع در اراضی پست جنوب منطقه اختصاص داده شده است. مواد مادری تشکیل دهنده خاک‌ها نیز روند تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند بطوری‌که رسوبات آبرفتی و کوهرفتی شامل سنگ‌های آذرین بازالتی آهکی مربوط به دوره کواترنر (در بخش‌های شمالی و مرکزی) به کفه‌های گلی و نمکی (در بخش‌های جنوبی) تغییر می‌کنند.

منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت قزوین می‌باشد که یکی از دشت‌های مهم برای تولیدات کشاورزی در کشور است. منطقه مورد مطالعه دارای سه نوع کاربری کلی شامل کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مرتع است. کشت‌های آبی بصورت گندم، جو، یونجه، ذرت و باغات انگور، سیب، بادام، هلو و زیتون می‌باشد که بیشتر در دشت‌های میانی منطقه متمرکز می‌باشند. مرتع غیر شور و کشت دیم در قسمت‌های شمالی و اراضی مرتعی شور در قسمت‌های جنوبی دیده می‌شوند (Mousavi et al., 2022؛ رحمانی و همکاران، ۱۴۰۱). اراضی مورد مطالعه طبق استعداد و قابلیت‌شان مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. این امر به همراه تغییرات اقلیمی و همچنین برنامه‌های مدیریتی نادرست از جمله استفاده از آب‌های شور در آبیاری، استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و بکارگیری سیستم‌های آبیاری تحت فشار باعث تغییر اراضی و افزایش تجمع نمک‌های محلول از جمله سدیم در خاک‌ها شده است. بدین ترتیب که خاک‌ها در قسمت‌های جنوب غربی و شرقی به سمت اراضی پست بصورت شور و سدیمی به همراه تجمع گچ می‌باشند (رحمانی و همکاران، ۱۴۰۱). بررسی ارزیابی تناسب این اراضی برای کشت‌های معمول منطقه بیانگر محدودیت‌های خاکی ناشی از شوری و قلیا بخصوص در قسمت‌های جنوبی منطقه و اراضی پست می‌باشد (خاموشی و همکاران، ۱۴۰۳).



شکل ۱- موقعیت قرارگیری منطقه مورد مطالعه در ایران، بین دو استان البرز و قزوین به همراه محل حفر ۲۸۱ خاک‌رخ مطالعه شده بر روی تصویر گوگل ارث. مناطق شهری و صنعتی به رنگ سیاه نشان داده شده‌اند.

روش اجرا

به منظور انجام این مطالعه، بر اساس ترکیبی از روش‌های نمونه‌برداری تصادفی و شبکه‌ای تعدادی خاک‌رخ و مته در منطقه مورد مطالعه قرار گرفتند. در نهایت تعداد ۲۸۱ خاک‌رخ به فاصله تقریبی ۸۰۰-۱۲۰۰ متر در سطح منطقه مورد بررسی قرار گرفت. در دشت‌ها و اراضی با خاک‌های عمیق خاک‌رخ‌ها تا عمق ۲۰۰ متر مورد بررسی قرار گرفتند و در قسمت‌های با خاک کم عمق، خاک‌ها تا بالای سنگ بستر یا لایه محدود کننده مطالعه شدند. پس از تشخیص و مطالعه افق‌های ژنتیکی، نمونه‌برداری از عمق‌های مختلف خاک‌رخ‌ها انجام شد (Schoeneberger et al., 2012). به منظور انجام این مطالعه، میزان هدایت الکتریکی و همچنین سدیم، کلسیم و منیزیم محلول در تمامی نمونه‌های (افق‌های خاک‌رخ‌ها) به روش استاندارد اندازه‌گیری شدند (Sparks, 1996). نسبت جذب سدیم از رابطه ارائه شده توسط Suarez (1981) محاسبه گردید.

با درون‌یابی وزنی عمودی با استفاده از توابع خطی (Malone et al., 2009) بسته aqp (Beaudette et al., 2023) نرم‌افزار R (R Core Team, 2022) میزان نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) در سه عمق ۵۰-، ۱۰۰- و ۱۵۰- سانتی‌متری متوسط‌گیری شدند. بدین ترتیب که در محل هر خاک‌رخ سه عدد برای هدایت الکتریکی و سه عدد برای نسبت جذب سدیم به دست آمد. تعداد ۴۵ عدد متغیر ژئومورفومتریک مشتقات درجه اول و دوم مدل رقومی ارتفاعی آلوس پالسار (<https://asf.alaska.edu>) با دقت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر در نرم‌افزار SAGA (Conrad et al., 2015) تهیه شدند. همچنین، ۲۷ شاخص از میانگین ۶ ساله تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در سامانه Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) تهیه شدند. نقشه مواد مادری از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه ژئوform از روی هم انداختن نقشه‌های شکل زمین و زمین‌شناسی در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. به منظور وارد کردن پارامترهای اقلیمی در مدل‌های پیش‌بینی کننده، نقشه‌های میانگین سالانه دما و بارندگی با درون‌یابی کریجینگ بیزی داده‌های ماهانه ۲۴ ایستگاه هواشناسی منطقه مطالعاتی در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند (Mousavi et al., 2022). وضوح مکانی شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای، نقشه پارامترهای اقلیمی، نقشه‌های زمین‌شناسی و ژئوform با استفاده از تابع نمونه‌برداری مجدد و روش دودویی (bilinear) با متغیرهای ژئومورفومتریک بدست آمده از مدل رقومی ارتفاعی (۱۲/۵ متر) و در سیستم مختصات مرجع متریک (WGS 1984, UTM 39N) در نرم‌افزار ArcGIS یکسان‌سازی شدند.

در نهایت، پایگاه داده با ابعاد ۸۰ در ۲۸۱ از اطلاعات موقعیت مکانی خاک‌رخ‌ها، مقادیر ویژگی‌های خاک (هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم) و مقادیر متغیرهای محیطی در موقعیت جغرافیایی هر یک از خاک‌رخ‌ها تهیه گردید.

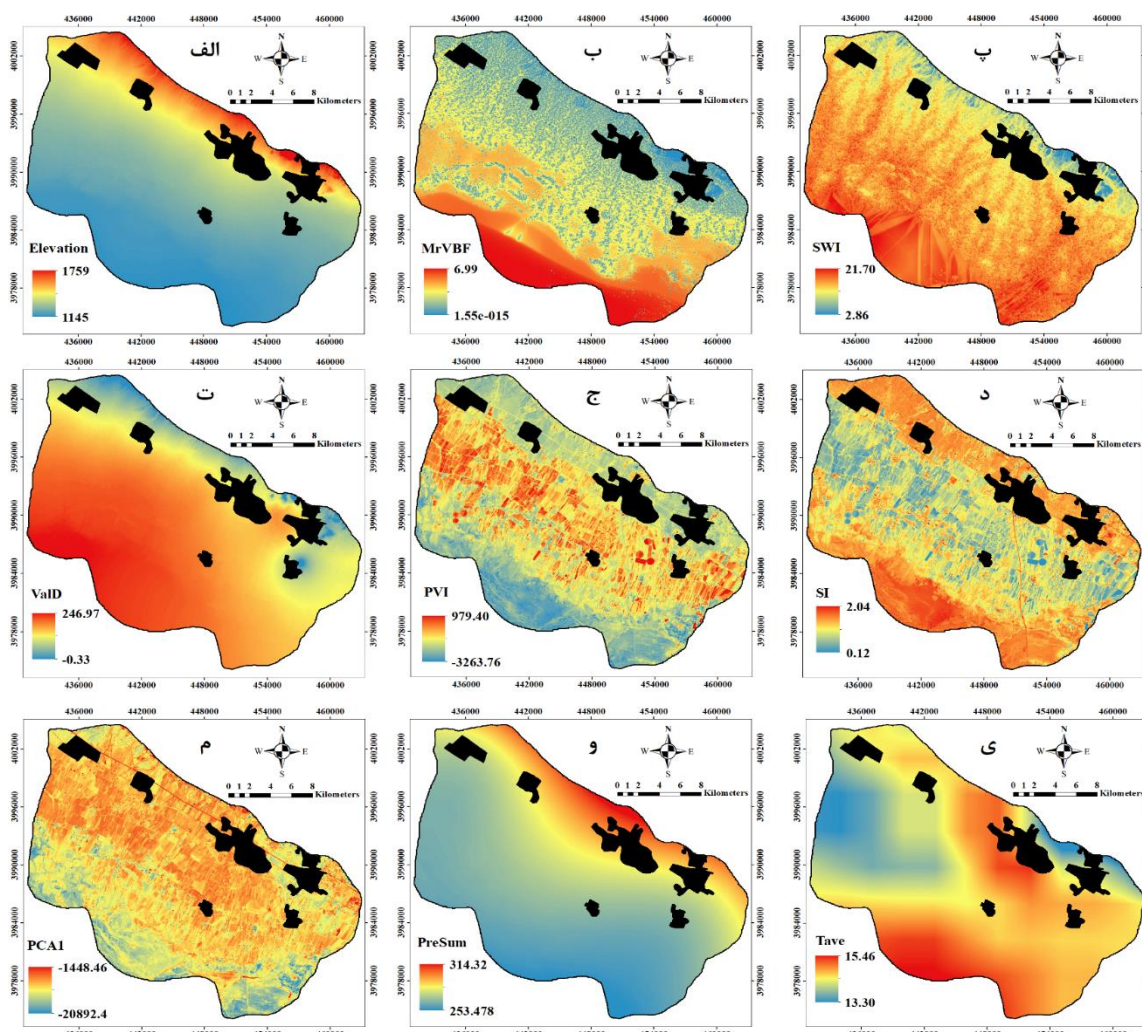
با در نظر گرفتن تابع اسکورپن (scorpan) (McBratney et al., 2003)، مهم‌ترین متغیرهای محیطی توصیف کننده توزیع نسبت جذب سدیم بر اساس نظر کارشناس خبره و همچنین مدل‌های ریاضی انتخاب شدند. بدین منظور، ابتدا تمام متغیرهای محیطی برای تعیین میزان همبستگی و همچنین همپوشانی اطلاعات آن‌ها با کمک آنالیز تجزیه مولفه‌های اصلی و همچنین روش شاخص تورم واریانس (VIF) به ترتیب با استفاده از توابع prcomp و vif در نرم‌افزار R مورد بررسی قرار گرفتند. پس از حذف متغیرهایی که بیشترین همپوشانی را با یکدیگر داشتند، بهترین انتخاب متغیرها با در نظر گرفتن روش حذف ویژگی برگشتی (RFE) از تابع rfe در نرم‌افزار R انتخاب شدند. با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه و با بررسی کارشناس خبره، ۹ متغیر کمکی محیطی انتخاب و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. متغیرهای انتخاب شده در شکل ۲ و جزئیات مربوط به هریک از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

به منظور دستیابی به بهترین نقشه پراکنش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم، مدل‌سازی و پیش‌بینی بر اساس ارتباط بین مقادیر این ویژگی‌های خاکی با متغیرهای محیطی کمکی انتخاب شده با استفاده از مدل‌های کوپیست (cubist)، جنگل تصادفی (random forest)، شبکه عصبی مصنوعی (neural network) و گرادیان بوستینگ (xgboost) در سه عمق ۵۰-، ۱۰۰- و ۱۵۰- سانتی‌متری انجام شد. مدل‌ها به ترتیب با استفاده از توابع rf، nnet و xgbTree بسته caret (Kuhn, 2008) نرم‌افزار R انجام شدند.

میانگین وزنی ساده چهار نقشه بدست آمده از مدل‌های مختلف برای هر ویژگی به عنوان نقشه نهایی آن ویژگی در نظر گرفته شد (Wu & Levinson, 2021). ارزیابی مدل‌ها به روش ارزیابی متقاطع با در نظر گرفتن ۱۰ قسمت از داده‌ها (10-fold cv) و تعیین مقدار ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی تطابق لین (LCCC) طبق فرمول‌های زیر انجام گرفت. بدین منظور از تابع goof بسته ithir (Malone, 2016) در نرم‌افزار R استفاده شد.

جدول ۱- متغیرهای محیطی انتخاب شده برای مدل‌سازی و پیش‌بینی توزیع شوری و قلیا بودن خاک‌های مورد مطالعه در سه عمق ۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متر

علامت اختصاری	متغیر محیطی (واحد)	عامل اسکورپین	منبع	مرجع
Elevation	ارتفاع (متر)	پستی و بلندی	مدل رقومی ارتفاع	https://asf.alaska.edu/
MrVBF	شاخص همواری دره با قدرت تفکیک بالا (-)	پستی و بلندی اقلیم	مدل رقومی ارتفاع	Gallant and Dowling (2003)
ValD	عمق دره (متر)	پستی و بلندی	مدل رقومی ارتفاع	Abdel-Kader (2011)
SWI	شاخص خیسگی ساگا (-)	پستی و بلندی اقلیم	مدل رقومی ارتفاع	Conrad et al. (2015)
PVI	شاخص پوشش گیاهی عمودی (-)	موجودات زنده خاک	تصاویر ماهواره‌ای	Richardson and Wiegand (1977)
SI	شاخص شوری (-)	خاک مواد مادری	تصاویر ماهواره‌ای	Allbed and Kumar (2013)
PC1	مولفه اول آنالیز pca (-)	خاک مواد مادری	مدل رقومی ارتفاع تصاویر ماهواره‌ای نقشه‌های موضوعی	Nield et al. (2007)
PreSum	میانگین بارندگی (میلی‌متر)	اقلیم	داده‌های اقلیمی	Krivoruchko and Gribov (2019)
Tave	میانگین دما (درجه سانتی‌گراد)	اقلیم	داده‌های اقلیمی	Krivoruchko and Gribov (2019)



شکل ۲- متغیرهای محیطی انتخاب شده برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مکانی شوری و قلیا بودن خاک‌های مورد مطالعه در سه عمق ۰-۵۰، ۵۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متر. برای اطلاع از جزئیات هر یک از متغیرهای محیطی به جدول ۱ مراجعه شود.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$LCCC = \frac{2r\sigma_{Pi}\sigma_{Oi}}{\sigma_{Pi}^2 + \sigma_{Oi}^2 + (\bar{P}_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

با توجه به فرمول‌ها، P_i و O_i مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر واقعی در کل مشاهدات (n)، r ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی، σ_{Pi}^2 و σ_{Oi}^2 به ترتیب واریانس مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی می‌باشند. عدم قطعیت مدل‌ها با محاسبه فواصل پیش‌بینی با استفاده از مدل بوت‌استرپینگ با ۵۰ تکرار در نرم‌افزار R اندازه‌گیری شد (Malone et al., 2018). فواصل پیش‌بینی با محاسبه میانگین و خطای استاندارد پیش‌بینی‌ها در تمام تکرارهای بوت‌استرپ به دست آمد. حد پیش‌بینی بالا و پایین به ترتیب با جمع و کم کردن خطای استاندارد از میانگین پیش‌بینی تعیین شد. پس از تهیه نقشه‌های عدم قطعیت هریک از مدل‌ها برای دو ویژگی خاکی مورد بررسی، میانگین وزنی آن‌ها به عنوان نقشه عدم قطعیت پیش‌بینی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در عمق‌های مختلف به دست آمد.

نتایج و بحث

آنالیز داده‌های خاک

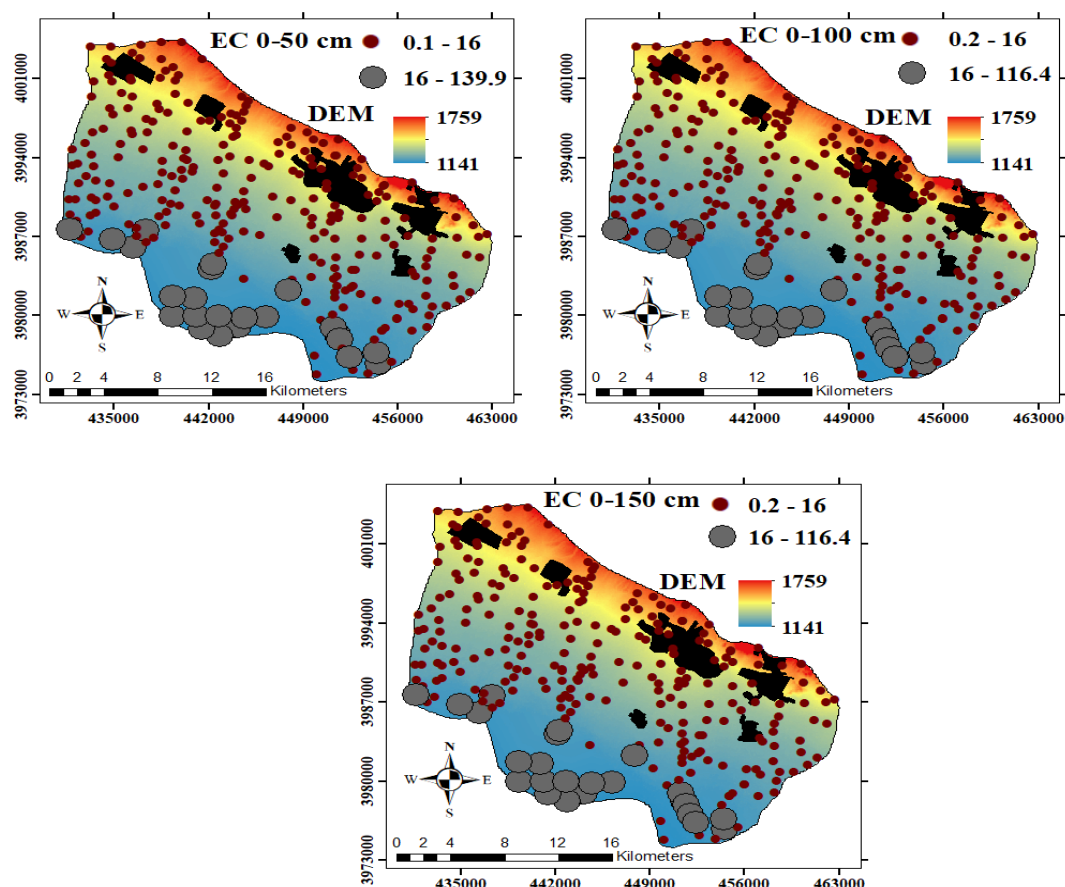
جدول ۲ خلاصه آماری مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم خاک‌ها در سه عمق مورد بررسی را نشان می‌دهد. میانگین تغییرات شوری خاک از ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر در سطح تا ۶/۲ دسی‌زیمنس بر متر در کل خاک‌رخ متغیر است که بیانگر افزایش میزان شوری در اعماق خاک‌رخ می‌باشد که با اظهارات موسوی و همکاران (۱۴۰۰) هم‌خوانی دارد. در رابطه با قلیا بودن نیز روند مشابه مشاهده می‌شود، بطوریکه میانگین میزان نسبت جذب سدیم از ۹/۳ در سطح تا ۹/۷ در طول خاک‌رخ افزایش می‌یابد. بنابراین، میزان قلیا بودن خاک‌ها در سطح و کل خاک‌رخ نسبت به شوری بیشتر می‌باشد که با عمق افزایش نشان می‌دهد. این دو ویژگی در هر سه عمق تغییرات مکانی زیادی را نشان می‌دهند که با مقادیر ضریب تغییرات بیشتر از ۳۵ درصد مشخص می‌شود (Wilding, 1985). میزان تغییرپذیری مکانی هر دو ویژگی در سطح بیشتر از عمق‌های دیگر می‌باشد. تغییرات اقلیمی (کاهش میزان بارندگی و افزایش دما و تبخیر و تفرق از شمال به سمت جنوب منطقه)، تغییر ویژگی‌های خاکی از جمله بافت (افزایش میزان رس و سیلت از شمال منطقه به سمت جنوب) و همچنین برنامه‌های مدیریتی از جمله استفاده از بی‌رویه از کودهای شیمیایی و بکارگیری سیستم‌های آبیاری تحت فشار در سطح منطقه، این امر قابل توجه می‌باشد (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Wang et al., 2024). هدایت الکتریکی در تمامی عمق‌های مورد بررسی تغییرات بیشتری نسبت به ویژگی نسبت جذب سدیم نشان می‌دهند. با توجه به آنالیزهای انجام شده، توزیع هر دو ویژگی در سه عمق مورد بررسی دارای چولگی شدید می‌باشد که نشان دهنده انحراف توزیع از نمودار نرمال می‌باشد. این امر در سطح برای هر دو ویژگی بیشتر از سایر عمق‌ها می‌باشد که در مورد هدایت الکتریکی انحراف بیشتری از توزیع نرمال را نسبت به میزان نسبت جذب سدیم نشان می‌دهد. بررسی کلاس‌های شوری و قلیا بودن خاک‌ها نشان داد که بیش از ۶۵ درصد خاک‌ها در منطقه غیر شور و حدود ۹ درصد آن‌ها خیلی شور هستند. این در حالی است که ۱۸ درصد خاک‌ها با خطر قلیا بودن مواجه هستند و مابقی بدون قلیا مشاهده شدند.

بررسی دقیق‌تر توزیع این دو ویژگی در سطح منطقه بیانگر افزایش میزان شوری و قلیا بودن خاک از قسمت‌های شمالی منطقه شامل تپه، فلات و دشت‌های مرتفع به سمت جنوب شامل دشت‌های کم‌ارتفاع و اراضی پست (با بافت خاک سنگین‌تر، میزان بارندگی کمتر و دمای بیشتر) می‌باشد (شکل ۳). به منظور سهولت تشخیص مناطق پرخطر از نظر شوری (با هدایت الکتریکی بالاتر از ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر) و همچنین قلیا بودن (با نسبت جذب سدیم بیشتر از ۱۳)، مقادیر این دو ویژگی به صورت دو دسته کم‌خطرتر (هدایت

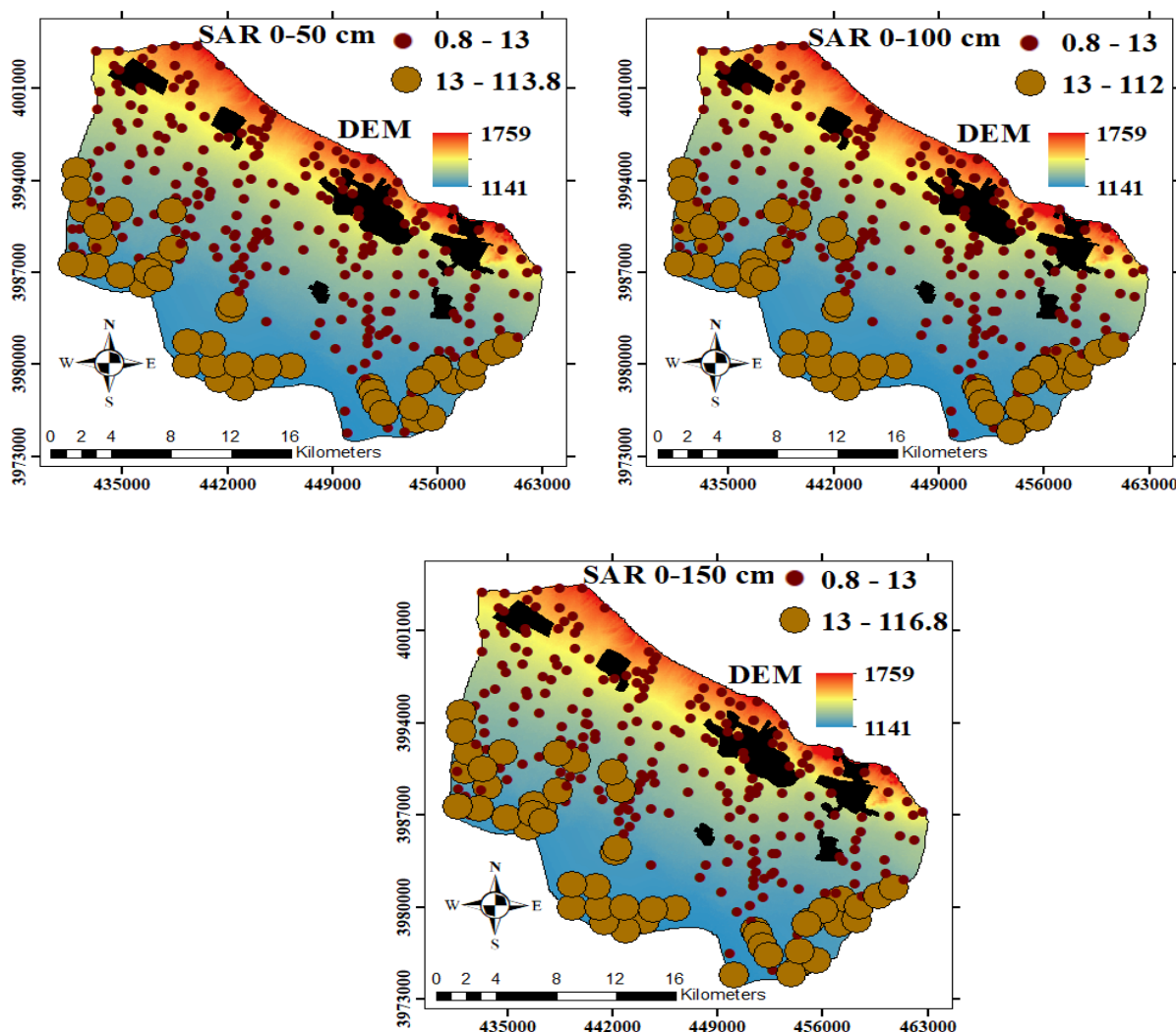
الکتریکی کمتر از ۱۶ دسی زمینس بر متر که شامل محدوده‌های غیر شور، شوری ناچیز، شوری کم و شوری متوسط می‌شوند و نسبت جذب سدیم کمتر از ۱۳ که شامل خاک‌های غیر سدیمی و سدیمی می‌شوند) و بر خطر (FAO, 2023; Soil Survey Manual, 2018; Soil Survey Staff, 2022) در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز ملاحظه می‌گردد، شوری در هر سه عمق روند افزایشی یکسانی را نشان می‌دهد که محدود به قسمت‌های جنوبی منطقه می‌باشد و از پایین‌ترین قسمت‌های دشت‌های کم ارتفاع شروع و تا اراضی پست ادامه دارند. با این حال، مناطق پرخطر از نظر قلیا بودن از قسمت‌های شرقی و غربی منطقه شروع شده و به دشت‌های کم ارتفاع و اراضی پست ختم می‌شوند. تغییرات مقدار این ویژگی در سه عمق مختلف روند متفاوتی را نشان می‌دهد بطوریکه مقادیر بالای قلیا بودن خاک در عمق‌های ۱۰۰-۰ و ۱۵۰-۰ سانتی‌متر در قسمت‌هایی از مرکز منطقه به سمت غرب نیز مشاهده می‌گردد.

جدول ۲- توصیف آماری میانگین مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در عمق‌های مختلف در منطقه مطالعاتی

متغیر	عمق (سانتی‌متر)	حداقل	حداکثر	بازه	میانگین	میان	واریانس	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی غیر شور	شوری ناچیز	شوری کم	شوری خیلی
EC (dS/m)	۵۰-۰	۰/۱	۱۳۹/۹	۱۳۹/۸	۵/۷	۱/۱	۲۷۵/۰	۱۶/۶	۲۹۰/۰	۵/۳	۳۴/۵	۶۸/۰	۹/۰	۳/۸
	۱۰۰-۰	۰/۲	۱۱۶/۴	۱۱۶/۲	۶/۰	۱/۱	۲۵۸/۳	۱۶/۱	۲۶۶/۱	۴/۷	۲۷/۰	۶۵/۰	۹/۰	۳/۹
	۱۵۰-۰	۰/۲	۱۱۶/۴	۱۱۶/۲	۶/۲	۱/۲	۲۶۲/۷	۱۶/۲	۲۶۲/۱	۴/۶	۲۵/۷	۶۵/۰	۸/۰	۴/۹
SAR	۵۰-۰	۰/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۰	۹/۳	۱/۶	۴۱۴/۰	۲۰/۴	۲۲۰/۲	۳/۵	۱۴/۹	۷۳/۰	۱۲/۰	۱۰/۱
	۱۰۰-۰	۰/۸	۱۱۲/۰	۱۱۱/۲	۹/۵	۱/۸	۳۴۴/۷	۱۸/۶	۱۹۶/۲	۳/۲	۱۳/۴	۷۰/۰	۱۲/۰	۱۴/۱
	۱۵۰-۰	۰/۸	۱۱۶/۸	۱۱۶/۰	۹/۷	۱/۸	۳۴۰/۱	۱۸/۴	۱۹۱/۱	۳/۱	۱۳/۳	۷۰/۰	۱۲/۰	۱۴/۱



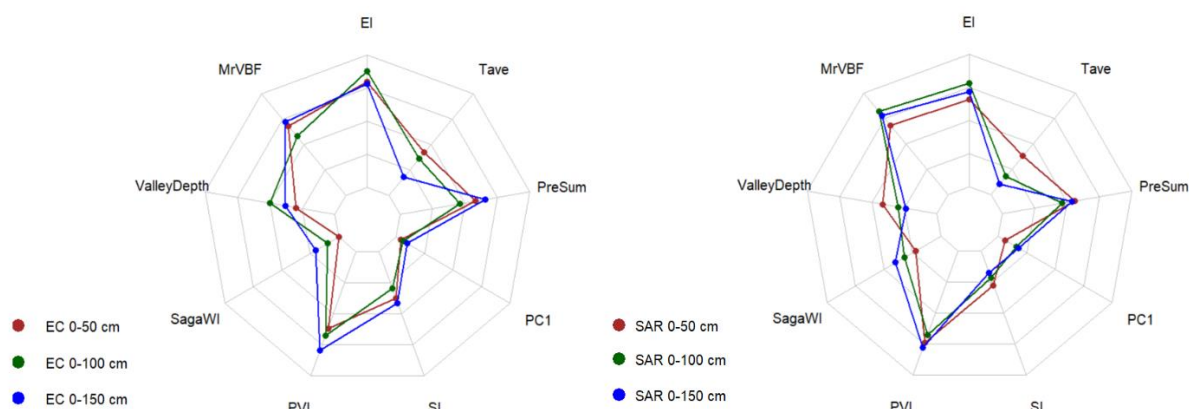
شکل ۳- توزیع مناطق پرخطر از نظر شوری ($EC > 16$ dS/m) و قلیا بودن ($SAR > 13$) در عمق‌های مختلف مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه بر روی مدل رقومی ارتفاع. توزیع خاک‌رخ‌های با خطر کمتر شوری ($EC < 16$ dS/m) و قلیا بودن ($SAR < 13$) نیز بر روی شکل نمایش داده شده‌اند.



ادامه شکل ۳- توزیع مناطق پر خطر از نظر شوری ($EC > 16 \text{ dS/m}$) و قلیا بودن ($SAR > 13$) در عمق‌های مختلف مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه بر روی مدل رقومی ارتفاع. توزیع خاک‌رخ‌های با خطر کمتر شوری ($EC < 16 \text{ dS/m}$) و قلیا بودن ($SAR < 13$) نیز بر روی شکل نمایش داده شده‌اند.

به نظر می‌رسد که کاهش محسوس ارتفاع از قسمت‌های میانی منطقه به سمت اراضی پست جنوبی به همراه کاهش بارندگی و افزایش دما مهم‌ترین علت‌های افزایش میزان شوری و قلیا بودن در این قسمت‌ها و مخصوصاً در سطح خاک باشد (شکل ۲). بنابراین، پستی و بلندی، اقلیم و پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده شوری و قلیا بودن در منطقه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۴). این یافته‌ها با نتایج مطالعات انجام شده برای مدل‌سازی شوری در منطقه مورد مطالعه (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رضایی و همکاران، ۱۴۰۲) و همچنین مطالعات (Wang et al., 2024; Shahravini and Noroozi, 2021) همخوانی دارد. (Nabiollahi et al., 2021) به اهمیت شاخص‌های شوری و متغیرهای پستی و بلندی از جمله MrVBF و شاخص خیزی در مدل‌سازی تغییرات شوری و سدیمی بودن خاک‌های منطقه کردستان اشاره کردند. علاوه بر این‌ها، خصوصیات ذاتی خاک از جمله بافت و جنس مواد مادری آن‌ها نقش بسزایی در افزایش تجمع نمک‌ها و شور و سدیمی شدن خاک‌ها داشته است. بطوریکه، همان‌طور که در بخش توصیف منطقه مورد مطالعه ذکر شد، اراضی پست واقع در جنوبی‌ترین قسمت منطقه از جنس کفه‌های گلی و نمکی بوده که دارای بافت سنگین بصورت رسی، لوم رسی و لوم رسی شنی می‌باشند (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، به دلیل شکل خاص فیزیوگرافیک این قسمت، مواد مادری آبرفتی بالادست به راحتی در این قسمت تجمع یافته و با کاهش بارندگی و افزایش دما و در پی آن افزایش تبخیر و تعرق و همچنین بالا بودن سطح آب زیرزمینی تجمع نمک در خاک‌ها افزایش یافته است. این اظهارات با بیانات (Fathizad et al., 2020)، (Nabiollahi et al., 2021) و (Kilic and Kilic, 2007) هم راستا می‌باشند.

در تمامی عمق‌های مورد بررسی متغیرهای توپوگرافی ارتفاع و شاخص همواری دره با قدرت تفکیک بالا (MrVBF) بیش از ۸۰ درصد تغییرات این دو ویژگی را در منطقه توجیه می‌کنند. پوشش گیاهی، فاکتورهای اقلیمی و شاخص شوری به ترتیب در رده‌های بعدی اهمیت برای توصیف تغییرپذیری مکانی شوری و قلیا بودن در عمق‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه قرار دارند. رضایی و همکاران (۱۴۰۱) نیز بر برتری ویژگی‌های ژئومورفومتریک از جمله ارتفاع و MrVBF را در توصیف و مدل‌سازی تغییرات مکانی شوری خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) و زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی‌متر) در منطقه مورد مطالعه تأکید کردند. یافته‌های پژوهش حاضر اگرچه با نظر موسوی و همکاران (۱۴۰۰) مبنی بر اینکه در عمق‌های مختلف ترتیب اهمیت متغیرهای محیطی متفاوت می‌باشد و در سطح خاک شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای بخصوص شاخص شوری اهمیت بالایی در توصیف تغییرات مکانی شوری در منطقه را دارند هم راستا نمی‌باشند، اما از آن جایی که توپوگرافی بصورت غیر مستقیم سایر فاکتورها و عوامل خاک‌سازی در منطقه را کنترل می‌کند، این امر قابل توجیه است. به عنوان مثال، در قسمت‌های بالا دست منطقه با ارتفاع بیشتر، آبشویی بیشتر رخ داده و خاک‌ها بافت سبک‌تری دارند که با بالاتر بودن میزان بارندگی فرصت تجمع نمک‌ها در خاک کاهش می‌یابد اما در مقابل، در قسمت‌های جنوبی به سمت اراضی پست کاهش سرعت آبدوی، افزایش درصد رس و سیلت در خاک به همراه افزایش خاصیت موینگی خاک، کاهش بارندگی و افزایش دما (همراه با تغییر رژیم رطوبتی خاک از زیریک به سمت اریدیک) و همچنین وجود رژیم رطوبتی آکوئیک در اراضی پست باعث افزایش سرعت تجمع نمک‌های محلول در خاک و در نتیجه شور و قلیا شدن خاک‌ها شده است. مقادیر بالای MrVBF و شاخص خبسی به ترتیب نشان‌دهنده مناطق با بیشترین رسوب‌گذاری و تجمع آب می‌باشد که احتمال تجمع املاح و نمک‌ها را در قسمت‌های جنوبی منطقه و اراضی پست (شکل ۲) تایید می‌کنند (Jafari et al., 2012; Nabiollahi et al, 2021). بنابراین، می‌توان با اطمینان بیان کرد که مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده تغییرات مکانی شوری و قلیا بودن در منطقه مورد مطالعه پستی و بلندی و در راس آن‌ها ارتفاع می‌باشد که به خوبی در شکل ۴ اثر آن تایید شده است. این یافته‌ها با مطالعات Mohammadifar et al. (2021)، Wang et al. 2020 و Taghizadeh-Mehrjardi et al. 2016 مبنی بر اهمیت فاکتورهای پستی بلندی از جمله MrVBF، شاخص خبسی توپوگرافی به عنوان مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی تغییرات شوری خاک به ویژه شوری خاک عمقی هماهنگ می‌باشد. همچنین، با توجه به نتایج، پوشش گیاهی نیز بعد از توپوگرافی فاکتور مهم در پیش‌بینی شوری و قلیا بودن خاک بوده است. این یافته با مطالعات Brunner et al. (2007) مبنی بر اثر شوری بر کاهش پوشش گیاهی و همچنین مطالعات Zhang et al. (2011) مبنی بر تأثیر گیاهان شورپسند بر مدل‌سازی و پیش‌بینی شوری خاک هم‌راستا می‌باشد.



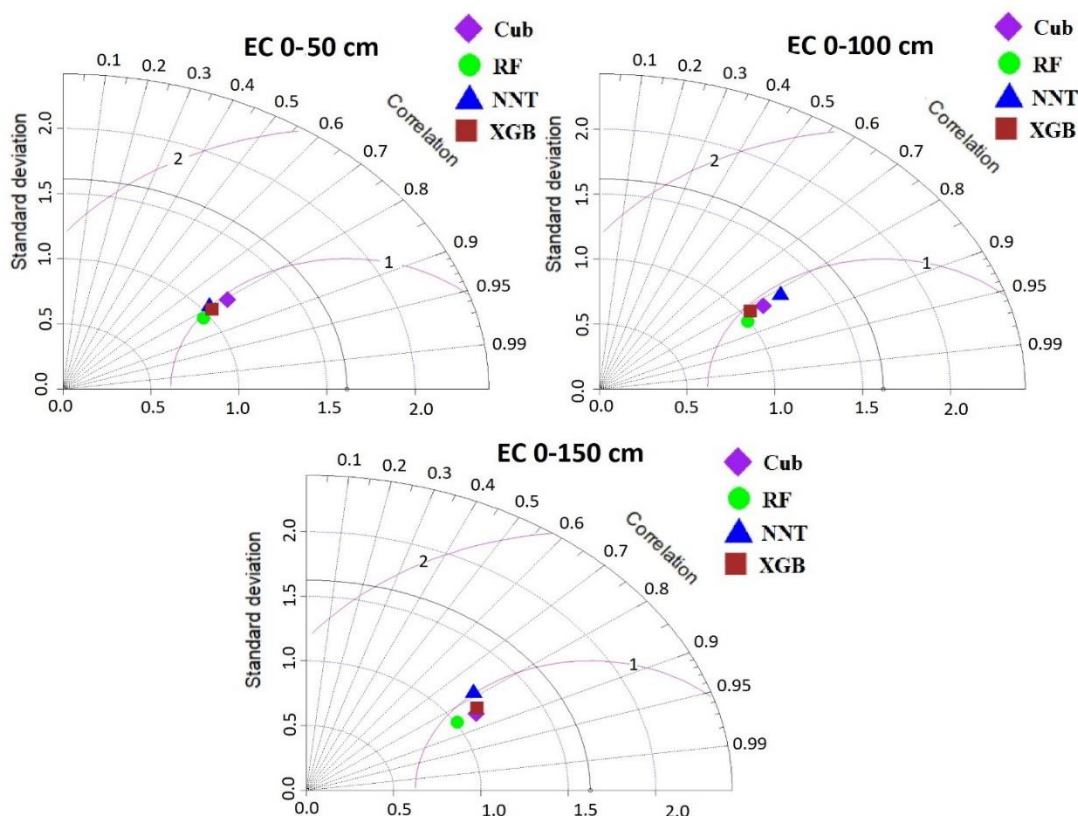
شکل ۴- نمودار اهمیت متغیرهای کمکی محیطی مهم در رابطه با تغییرات مکانی شوری (EC) و قلیا بودن (SAR) خاک‌های مورد مطالعه در عمق‌های مختلف (جزئیات مربوط به متغیرهای محیطی در جدول ۱ ارائه شده است).

مدل‌سازی

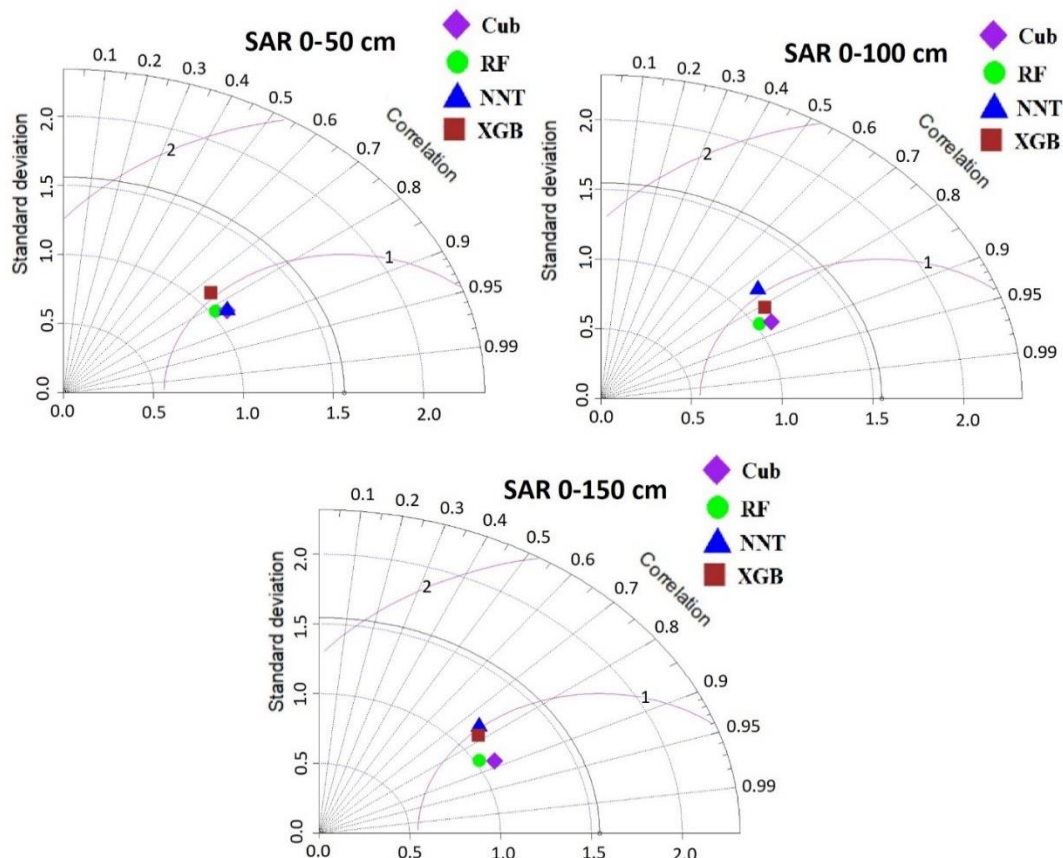
بررسی مدل‌های مختلف برای توصیف تغییرپذیری شوری نشان داد که تمامی مدل‌ها کارایی تقریباً مشابهی در عمق‌های مختلف دارند. این روند با ترسیم نمودار تیلور (Taylor, 2001) در شکل ۵ به خوبی قابل مشاهده است. در این نمودار یک خلاصه آماری از میزان مطابقت مقادیر شوری و قلیا بودن پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف با مقادیر مشاهدات ارائه می‌شود. اجزای کلیدی نمودار تیلور شامل انحراف معیار، ضریب همبستگی و میانگین حداقل مربعات خطا می‌باشند. انحراف معیار با فاصله شعاعی از مبدا نشان داده می‌شود که متغیر بودن مقادیر بدست آمده از مدل را در مقایسه با مشاهدات نشان می‌دهد. ضریب همبستگی با زاویه از محور x نشان داده می‌شود

که رابطه خطی بین پیش‌بینی‌های مدل و مشاهدات را اندازه‌گیری می‌کند. RMSE با فاصله از نقطه نشان دهنده مشاهدات روی محور X نشان داده می‌شود که تفاوت کلی بین مقادیر مدل و مشاهدات را کمی می‌کند. بنابراین، بر اساس مقادیر بدست آمده از هر مدل و مقادیر واقعی مشاهدات مربوط به هر ویژگی خاک مدل‌ها بر اساس انحراف معیار، ضریب همبستگی و RMSE آن‌ها بر روی نمودار رسم شده‌اند. بدین ترتیب، مدل‌هایی که به نقطه نشان دهنده مشاهدات نزدیک‌تر هستند عملکرد بهتری دارند. مدل‌هایی که در نزدیکی نقطه مشاهده در محور X قرار دارند دقیق‌تر هستند. بهترین مدل‌ها دارای ضرایب همبستگی بالا و RMSE پایین هستند و آن‌ها را در نزدیکی نقطه مشاهده قرار می‌دهند.

برای شوری سطحی مدل کوپیست نتایج بهتری نشان داده است. برای شوری ۰-۱۰۰ سانتی‌متری مدل شبکه عصبی و برای شوری ۰-۱۵۰ سانتی‌متری هر دو مدل کوپیست و گرادیان بوستینگ به یک میزان کارایی داشتند. با این حال، مطالعات موسوی و همکاران (۱۴۰۰) بیانگر کارایی بیشتر دو مدل جنگل تصادفی و کوپیست نسبت به مدل‌های درخت رگرسیون و نزدیک‌ترین همسایه برای مدل‌سازی تغییرات مکانی شوری خاک در عمق‌های استاندارد مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. رضایی و همکاران (۱۴۰۱) نیز به کارایی بالاتر مدل جنگل تصادفی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مکانی شوری خاک سطحی و زیر سطحی در منطقه نسبت به مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، درخت رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی اشاره کردند. نتایج بررسی‌ها در رابطه با قلیا بودن خاک‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های کوپیست و شبکه عصبی برای قلیا بودن خاک سطحی کارایی مشابه دارند. با این حال در عمق‌های ۰-۱۰۰ و ۰-۱۵۰ سانتی‌متری مدل کوپیست به دلیل اینکه بهتر از سایر مدل‌ها همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی را نشان می‌دهد، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها نشان داده است (شکل ۵).



شکل ۵- نمودار تیلور کارایی چهار مدل کوپیست (Cub)، جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (NNT) و گرادیان بوستینگ (XGB) برای مدل‌سازی شوری (EC) و قلیا بودن (SAR) خاک در عمق‌های مختلف



ادامه شکل ۵- نمودار تیلور کارایی چهار مدل کوپیست (Cub)، جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (NNT) و گرادیان بوستینگ (XGB) برای مدل‌سازی شوری (EC) و قلیا بودن (SAR) خاک در عمق‌های مختلف

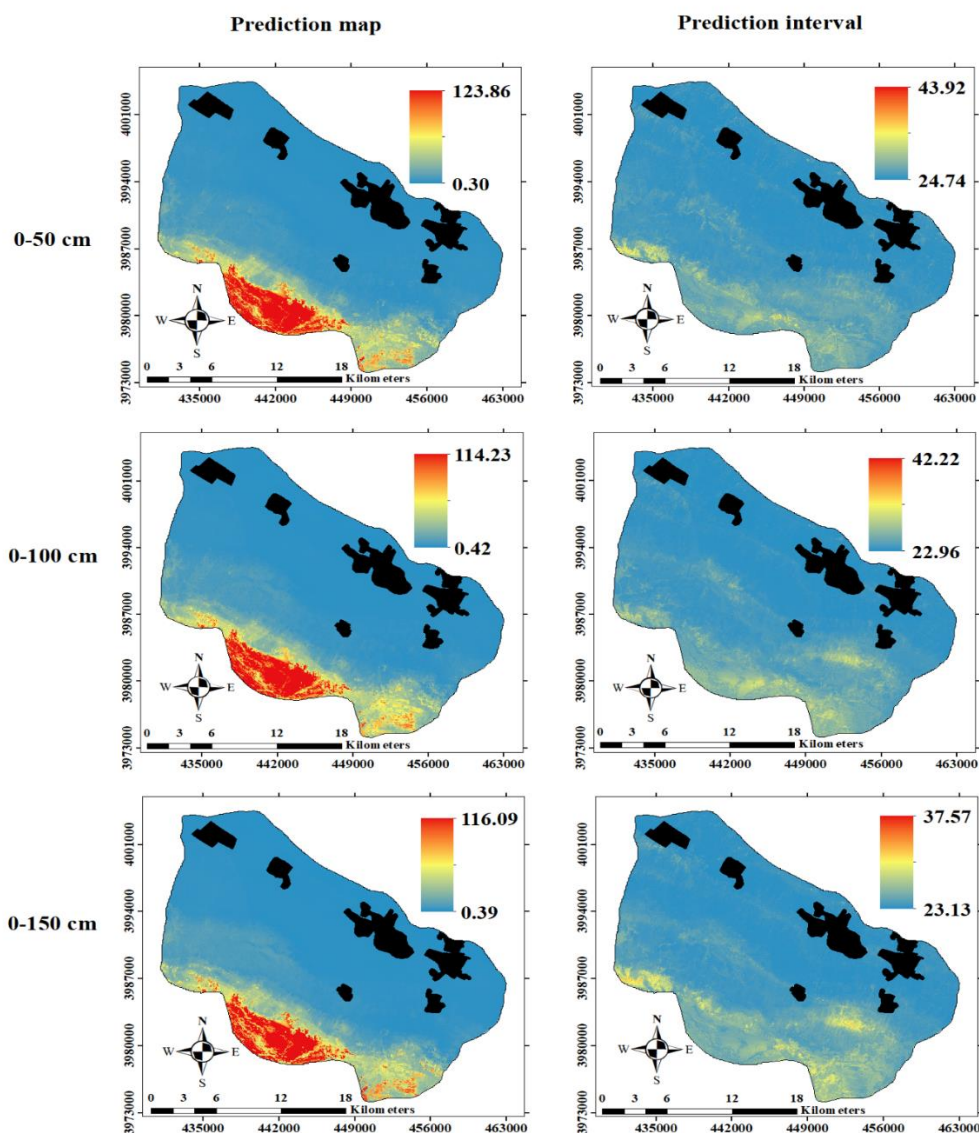
از آن جایی که مدل‌های به کار رفته کارایی مشابهی را در توصیف تغییرپذیری ویژگی‌های مورد بررسی و مدل‌سازی آن‌ها نشان می‌دهند، میانگین این مدل‌ها می‌تواند ضمن بهره‌گیری از نقاط قوت هر یک از مدل‌ها به نتایج نهایی قابل قبولی منجر گردد. Malone et al. (2014) بر کارایی خوب این روش در ترکیب نتایج پیش‌بینی مدل‌های مختلف به منظور بهره‌گیری از نقاط قوت هریک از آن‌ها تاکید دارند. Bogaert et al. (2023) با بهره‌گیری از روش میانگین‌گیری نقشه‌های پیش‌بینی بدست آمده از مدل‌های مختلف تعلیم ماشین برای کربن آلی و هدایت الکتریکی منطقه‌ای در اطراف دریاچه ارومیه، به بهبود پیش‌بینی‌های بدست آمده از ترکیب نقشه‌های مختلف اشاره کردند. نتایج کارایی میانگین ترکیب نقشه‌های پیش‌بینی مدل‌های کوپیست، جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و گرادیان بوستینگ برای شوری و قلیا بودن در عمق‌های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- کارایی مدل میانگین بر اساس مدل‌های تعلیم ماشین پایه (شکل ۴) برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی شوری و قلیا بودن خاک در عمق‌های مختلف

ویژگی خاک	R^2	RMSE	nRMSE	LCCC	حداقل پیش‌بینی	حداکثر پیش‌بینی
EC 0-50	۰/۷۶	۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۷۳	۰/۳۰	۱۳۳/۸۶
EC 0-100	۰/۷۸	۰/۹۳	۰/۱۵	۰/۷۴	۰/۴۲	۱۱۴/۲۳
EC 0-150	۰/۸۳	۰/۹۲	۰/۱۵	۰/۷۶	۰/۳۹	۱۱۶/۰۹
SAR 0-50	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۰۸	۰/۷۷	۰/۹۴	۱۱۲/۲۶
SAR 0-100	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۰۸	۰/۸۰	۰/۹۲	۱۱۰/۸۷
SAR 0-150	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۰۸	۰/۸۰	۰/۹۲	۱۱۴/۵۷

بررسی‌ها بیانگر کارایی خوب تمامی مدل‌های نهایی برای پیش‌بینی هر دو ویژگی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در هر سه

عمق مورد بررسی می‌باشد. ضریب تبیین برای تمامی مدل‌ها در محدوده ۰/۶۱ تا ۰/۸۱ بوده و بیانگر کارایی خوب مدل‌ها می‌باشد (Viscarra Rossel and McBratney, 2009). مقادیر توافق بین داده‌های اصلی و پیش‌بینی شده لین (LCCC) بیانگر میزان توافق کم و ضعیف بین این داده‌ها می‌باشد (McBride, 2005). با این حال، با در نظر گرفتن مقادیر خطای نرمال شده این گونه برآورد می‌شود که مدل‌ها پیش‌بینی‌های خوب برای مقادیر شوری خاک در عمق‌های مختلف ارائه داده‌اند (مقدار nRMSE بین ۰/۱ تا ۰/۲). این در حالی است که برای ویژگی قلیا بودن، پیش‌بینی‌های عالی با خطای نرمال کمتر از ۰/۱ انجام شده است (Wallach et al., 2006). کارایی مدل‌ها برای هر دو ویژگی با افزایش عمق افزایش یافته است که با نتایج ارائه شده در موسوی و همکاران (۱۴۰۰) مشابهت دارد. علت را شاید بتوان به کاهش ضریب تغییرات و همچنین میزان چولگی داده‌ها با افزایش عمق نسبت داد (جدول ۲). نتایج همچنین نشان می‌دهند که محدوده مقادیر پیش‌بینی شده شوری خاک سطحی (۵۰-۰ سانتی‌متر) به اندازه ۱۶ واحد کمتر از محدوده داده‌های اصلی در این عمق می‌باشد که این تفاوت برای عمق‌های ۱۰۰-۰ و ۱۵۰-۰ سانتی‌متری به ترتیب حدود ۲ و کمتر از ۱ واحد می‌باشد. این امر نشان دهنده عملکرد بهتر مدل‌های پیش‌بینی کننده شوری در عمق‌های بیشتر نسبت به افق سطحی می‌باشد. از طرف دیگر، تفاوت محدوده مقادیر پیش‌بینی قلیا بودن خاک‌ها از سطح به عمق روند متفاوتی را نشان می‌دهد بطوریکه از ۱/۶۸ در سطح به ۲/۳۵ در عمق می‌رسد.



شکل ۶- نقشه متوسط پیش‌بینی هدایت الکتریکی در عمق‌های مختلف به همراه نقشه عدم قطعیت مربوط به هر یک (قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر)

نقشه‌های نهایی پیش‌بینی کلاس‌های شوری و قلیا بودن خاک در سرتاسر منطقه مورد مطالعه در سه عمق ۵۰-۰، ۱۰۰-۰ و ۱۵۰-۰

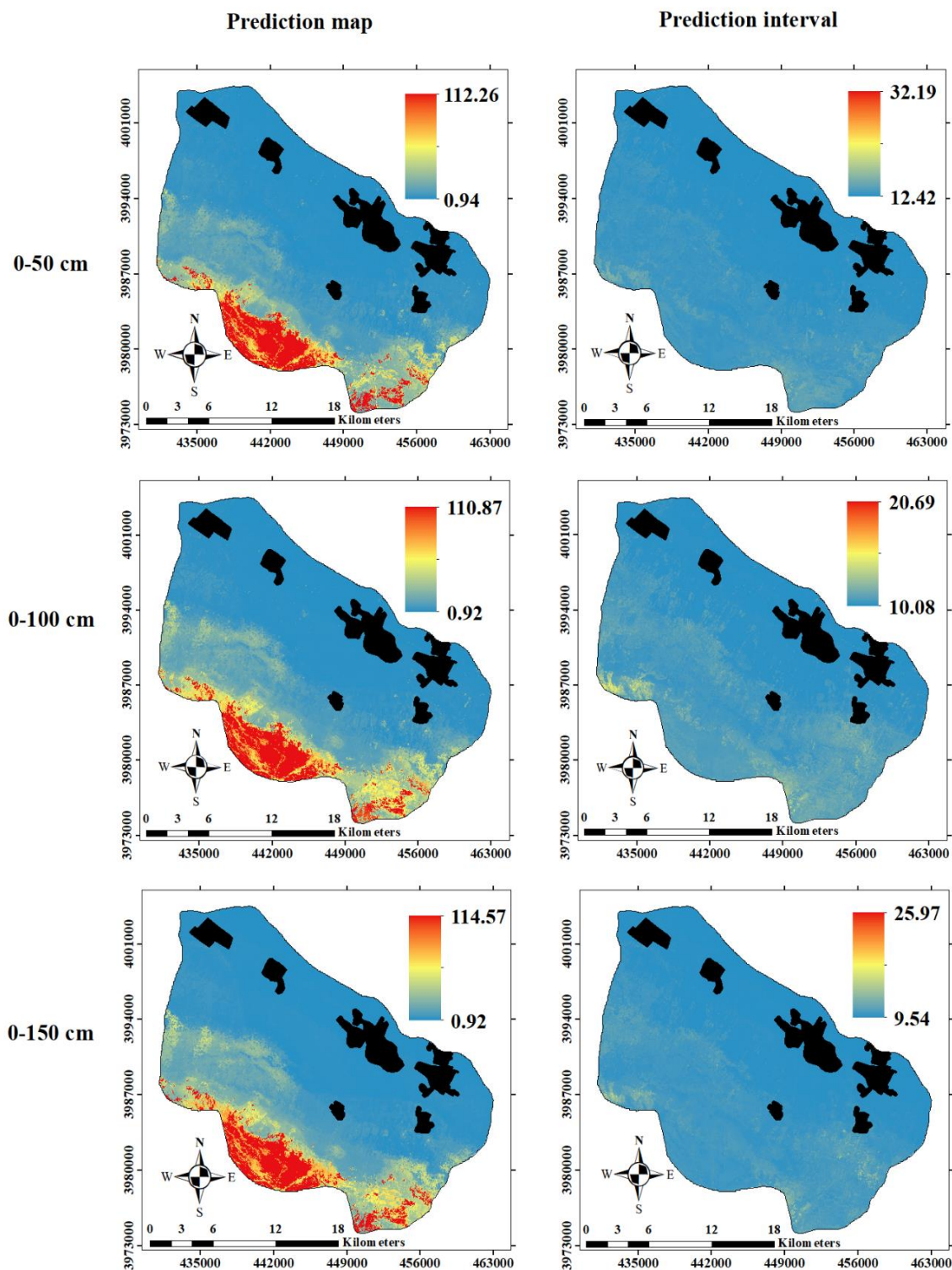
۱۵۰ سانتی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. حداقل و حداکثر مقدار شوری خاک در عمق سطحی از ۰/۳ تا ۱۲۳/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است که به میزان ۰/۲ واحد بیشتر از حداقل داده‌های اصلی و ۷/۴۶ واحد کمتر از حداکثر داده‌های اصلی می‌باشد. در عمق ۱۰۰-۰ سانتی‌متری مقدار شوری پیش‌بینی شده بین ۰/۴۲ تا ۱۱۴/۲۳ دسی‌زیمنس متغیر است که به ترتیب به میزان ۰/۲۲ و ۲/۱ واحد نسبت به حداقل و حداکثر داده‌های اصلی تفاوت نشان می‌دهد. مقادیر پیش‌بینی شده شوری در طول خاک‌رخ (عمق ۱۵۰-۰ سانتی‌متر) از ۰/۳۹ تا ۱۱۶/۰۹ واحد تغییر می‌کند که تغییرات کم‌تر و با هماهنگی بیشتر با محدوده تغییرات داده‌های اصلی را نشان می‌دهد (مقایسه جدول‌های ۲ و ۳).

کلاس‌بندی شوری خاک در ۵ کلاس غیر شور، شوری ناچیز، شوری کم، شوری متوسط و خیلی شور به خوبی تغییرات این ویژگی خاک را در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد و به درک بهتر از تغییرات شوری در منطقه در راستای ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب و بهره‌برداری بهتر از خاک‌ها متناسب با استعداد و قابلیت آن‌ها کمک می‌کند. در عمق سطحی از بالا به سمت جنوب منطقه، شوری با شیب یکسان افزایش می‌یابد (شکل ۶) بطوریکه مطابق با اطلاعات ارائه شده در جدول ۲، بیشتر مساحت منطقه شامل قسمت‌های شمالی و میانی بصورت غیر شور پیش‌بینی شده‌اند و به ترتیب به سمت جنوب منطقه و اراضی پست افزایش می‌یابند. در دو عمق دیگر نیز شوری خاک با شیب منظم از بالا به پایین منطقه افزایش می‌یابد (شکل ۶). در رابطه با عمق‌های میانی خاک‌رخ‌ها (۱۰۰-۰ سانتی‌متر)، خاک‌های با شوری ناچیز کمی افزایش نشان می‌دهند که با تغییرات فراوانی داده‌های اصلی (جدول ۲) هم‌خوانی دارد. اراضی با شوری ناچیز (هدایت الکتریکی بین ۲ تا ۴ دسی‌زیمنس بر متر) بیشتر در قسمت‌های جنوب غربی منطقه متمرکز شده‌اند. پیش‌بینی شوری در طول خاک‌رخ نشان می‌دهد که میزان خاک‌های با شوری کم (هدایت الکتریکی ۴-۸ دسی‌زیمنس بر متر) در قسمت‌های جنوب غربی منطقه نسبت به دو عمق قبل افزایش یافته است.

بررسی کلاس‌های قلیا بودن خاک‌ها نیز روند مشابه با تغییرات شوری مینی بر توسعه بیش از ۸۰ درصدی خاک‌های غیر سدیمی در قسمت اعظم منطقه (شمال و مرکز) و خاک‌های با نسبت جذب سدیم بالا در قسمت‌های جنوبی منطقه می‌باشد (شکل ۷) که با نتایج ارائه شده در جدول ۲ هماهنگ می‌باشند. نقشه‌های پراکنش قلیا بودن خاک‌ها نشان می‌دهد که میزان قلیا بودن در طول کل خاک‌رخ (عمق ۱۵۰-۰ سانتی‌متری) در قسمت‌های جنوب غربی و شرقی به سمت اراضی پست بیشتر از دو عمق دیگر (۵۰-۰ و ۱۰۰-۰ سانتی‌متر) می‌باشد.

مقایسه نقشه‌های پراکنش شوری و قلیا بودن در طول خاک‌رخ (عمق ۱۵۰-۰ سانتی‌متری) نشان می‌دهد که در قسمت جنوب غربی منطقه خاک‌های سدیمی با شوری کم، در جنوب شرقی خاک‌های سدیمی با شوری متوسط و در اراضی پست خاک‌های پرخطر از نظر شوری و سدیمی (هدایت الکتریکی بیشتر از ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم بیشتر از ۱۳) متمرکز شده‌اند، این موضوع باید در استفاده از این اراضی و مدیریت آن‌ها مدنظر قرار بگیرد. همچنین، به منظور درک بهتر تغییرات شوری و قلیا بودن خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های پیش‌بینی به دست آمده بصورت ۵ کلاس شوری (Soil Survey Manual, 2018) و ۴ کلاس قلیا بودن (Soil Survey Staff, 2017) در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. با توجه به این شکل، تغییرات شوری و سدیمی خاک‌ها قسمت‌های پایینی منطقه بصورت نوارهای منظم از مرکز به سمت جنوب تفکیک شده‌اند. این اطلاعات نیز می‌توانند برای مدیریت بهتر این اراضی در نظر گرفته شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده و نقشه‌های بدست آمده، میزان شوری و قلیا بودن خاک‌ها از سطح به عمق کاهش می‌یابد (جدول ۲). بطور کلی حدود ۶۵ درصد از منطقه خاک‌های غیر شور می‌باشند که قسمت‌های شمالی منطقه را پوشش می‌دهند. خاک‌های با شوری ناچیز با فراوانی حدود ۱۲ درصد در قسمت مرکزی به سمت جنوب غربی متمرکز شده‌اند. این در حالی است که خاک‌های با شوری کم و متوسط بصورت نوارهای باریک در انتهای دشت‌ها و در بالای اراضی پست قرار دارند که حدود ۹ تا ۳ درصد منطقه را شامل می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود خاک‌های با شوری متوسط بیشتر در قسمت جنوب شرقی منطقه متمرکز شده‌اند. خاک‌های خیلی شور نیز با فراوانی حدود ۸ درصد مختص قسمت جنوبی و اراضی پست می‌باشند. توزیع مکانی کلاس خاک‌های غیر سدیمی با فراوانی حدود ۷۰ درصد با خاک‌های غیر شور منطبق می‌باشد. این در حالی است که خاک‌های سدیمی با مناطق با شوری ناچیز و کم منطبق می‌باشد که در کل ۱۲ درصد از کل منطقه را پوشش می‌دهند. خاک‌های قلیا و بسیار قلیا با نسبت جذب سدیم بالاتر از ۱۳ در مناطق با شوری متوسط و زیاد هماهنگ می‌باشند که روی هم رفته حدود ۱۵ درصد از کل منطقه را شامل می‌شوند. بنابراین بنا بر آنچه از این نتایج بر می‌آید، بطور متوسط ۶۵-۷۵ درصد منطقه از نظر شوری و قلیا بدون محدودیت برای کشت انواع گیاهان هستند (غیر شور- غیر سدیمی)، تقریباً ۱۴ درصد از خاک‌ها با شوری ناچیز اما سدیمی هستند، حدود ۹ درصد کمی شور اما قلیا و حدود ۵ درصد با شوری

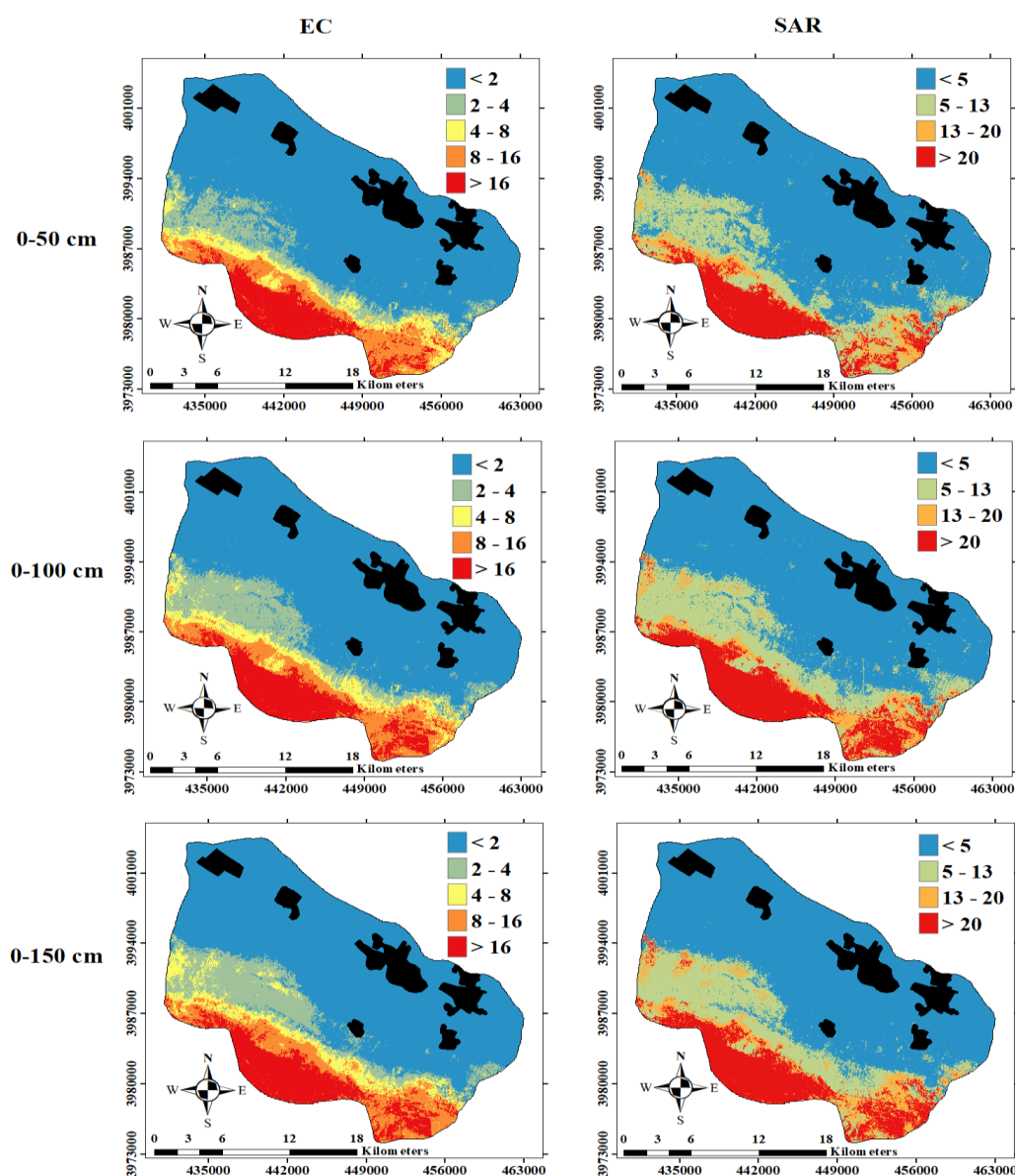
متوسط و قلیا می‌باشند. مناطق منتهی‌الیه جنوبی منطقه مطالعاتی و اراضی پست از نظر شوری و قلیا بودن در خطر هستند (خیلی شور - بسیار قلیایی) و نیاز به اجرای برنامه‌های مدیریتی مناسب دارند که بطور کلی ۱۰ الی ۱۴ درصد از منطقه را شامل می‌شوند.



شکل ۷- نقشه متوسط پیش‌بینی نسبت جذب سدیم در عمق‌های مختلف به همراه نقشه عدم قطعیت مربوط به هر یک (قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر)

بررسی دقیق نقشه‌های عدم قطعیت مرتبط با هر نقشه به تفسیر بهتر نتایج و ارزیابی آن‌ها کمک می‌کند (Omrani et al., 2021)

و Liu et al., 2024). عدم قطعیت مدل‌ها برای شوری و قلیا بودن خاک در هر سه عمق مورد بررسی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، میزان عدم قطعیت برای قلیا بودن برای هر سه عمق کمتر از شوری می‌باشد. اما بطور کلی میزان عدم قطعیت مدل‌ها در قسمت‌های جنوبی منطقه بیشتر از قسمت‌های شمالی می‌باشد که بی‌ثباتی نسبی مدل در کشف روابط پنهان بین تغییرات متغیر هدف و متغیرهای محیطی کمکی در این قسمت‌ها را نمایان می‌کند. این را می‌توان به تعداد محدود مشاهدات در این مناطق نسبت داد، که منجر به افزایش عدم قطعیت مدل‌ها شده است (Agaba et al., 2024). به عبارت دیگر، بیشترین میزان عدم قطعیت در مناطقی مشاهده می‌شود که از نظر پستی و بلندی صاف‌تر و متعادل‌تر می‌باشند که بیانگر توانایی بهتر و بالاتر مدل‌ها در توصیف تغییرپذیری مکانی مقادیر کم شوری و قلیا بودن خاک‌ها یعنی مناطق با توپوگرافی شدید می‌باشد. به عبارت دیگر، مدل ارتباط بین متغیرهای محیطی کمکی و مقادیر کمتر شوری و قلیا بودن خاک‌ها در مقایسه با مقادیر بیشتر آن‌ها را بهتر درک کرده است. Omrani et al. (2021) نیز به خوبی توانستند با استفاده از روش بوت‌استرپینگ، تغییرات عدم قطعیت مدل‌ها را برای پیش‌بینی شوری خاک نمایش دهند. Liu et al. (2024) از روش بوت‌استرپینگ برای ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های شوری و سدیمی بودن خاک‌های متأثر از نمک و تهیه نقشه‌های مربوط به آن استفاده کردند.



شکل ۸- گسترش مکانی توزیع درجات مختلف شوری (EC) و قلیا بودن (SAR) خاک در عمق‌های مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

نتیجه گیری

در این مطالعه روند تغییرات مکانی سطحی و عمقی دو ویژگی مهم شوری و قلیا بودن خاک به عنوان دو عامل مهم محدود کننده قابلیت و کاربری اراضی در منطقه خشک و نیمه خشک آبیک در سه عمق مهم ۵۰-۰، ۱۰۰-۰ و ۱۰۰-۱۰۰ سانتی متری مورد بررسی قرار گرفت. داده های شوری و سدیمی بودن ۲۸۱ خاک رخ بررسی شده نشان داد که هر دو این ویژگی ها دارای تغییرپذیری بالای ۳۵٪ می باشند بطوریکه برای هدایت الکتریکی (نماینده شوری خاک) این مقدار صرف نظر از عمق مورد بررسی از حدود ۰/۱ در شمال منطقه تا بیش از ۱۱۵ دسی زیمنس بر متر در جنوبی ترین قسمت منطقه تغییر می کند. این در حالی است که مقدار حداقل و حداکثر نسبت جذب سدیم (نماینده قلیا بودن خاک) از ۰/۸ تا بیش از ۱۱۵ متغیر می باشد. بیشترین مقدار شوری در عمق سطحی ۵۰-۰ سانتی متر دیده می شود در حالیکه تغییرات سدیمی بودن در طول خاک رخ زیاد نمی باشد. مناطق جنوبی منطقه مورد مطالعه از قسمت های جنوبی دشت های کم ارتفاع تا اراضی پست بیشترین میزان شوری را نشان می دهند (حدود ۲۰٪ منطقه)، از طرف دیگر، بیشترین مقدار سدیمی بودن خاک ها از قسمت های مرکزی به سمت جنوب غربی و شرقی به سمت اراضی پست دیده می شود که حدود ۱۵٪ از منطقه را شامل می شوند.

با استفاده از روش RFE و با تایید نهایی کارشناس خبره، ۹ متغیر محیطی به عنوان نماینده فاکتورهای خاک سازی مدل اسکورپن شامل خاک (شاخص شوری)، اقلیم (بارندگی و دما)، موجودات زنده (شاخص پوشش گیاهی)، پستی و بلندی (ارتفاع، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، عمق دره، شاخص خیزی ساگا) و مواد مادری (مولفه اول آنالیز pca) انتخاب شدند. بررسی ها حاکی از اهمیت نسبی بیشتر ارتفاع، شاخص همواری دره با قدرت تفکیک بالا، شاخص پوشش گیاهی، فاکتورهای اقلیمی و شاخص شوری در توصیف و مدل سازی تغییرات شوری و سدیمی بودن خاک های منطقه می باشند.

مدل های تعلیم ماشین کوبیست، جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و گرادیان بوستینگ با کارایی تقریباً مشابهی موفق به تهیه نقشه های پراکنش شوری و سدیمی بودن در اعماق مختلف در طول خاک رخ ها شدند. بطوریکه نقشه میانگین بدست آمده از ترکیب این نقشه ها کارایی خوب با ضریب تبیین ۰/۶۱-۰/۸۱ و خطای نرمال ۰/۰۸ تا ۰/۱۷ منجر شدند. بیشترین میزان عدم قطعیت مدل ها در قسمت های جنوبی منطقه با تغییرات زیاد مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در فاصله کم، تعداد کمتر مشاهدات خاک، توپوگرافی کم تر مشاهده شد که این مقدار برای مدل های پیش بینی کننده سدیمی بودن در تمامی عمق ها نسبت به شوری کم تر بود.

بطور کلی یافته های این مطالعه تایید کننده بکارگیری روش های نقشه برداری رقومی خاک بخصوص ترکیب مدل های مختلف به عنوان گامی موثر در تهیه نقشه های دقیق شوری و سدیمی بودن خاک های منطقه خشک و نیمه خشک آبیک می باشد. نتایج بدست آمده در قالب نقشه های شوری و سدیمی بودن خاک ها به همراه نقشه های عدم قطعیت آن ها می توانند به عنوان راهنمای مناسبی برای مدیران، کارشناسان خاک و آب و بهره برداران اراضی به منظور برنامه ریزی های آینده استفاده از اراضی باشند. در این راستا، مطالعه دقیق تر ارزیابی تناسب اراضی برای انواع کشت ها از جمله درخت و باغ بخصوص در قسمت های جنوبی منطقه بر اساس این اطلاعات می تواند راهگشا باشد. همچنین، این اطلاعات می توانند برای حفاظت خاک بخصوص در قسمت های جنوبی منطقه مورد استفاده قرار بگیرند. در پایان، روش مورد استفاده قابل بکارگیری در سایر مناطق خشک و نیمه خشک کشور که با مشکل شوری و قلیا بودن خاک مواجه می باشند، است. با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در قسمت های جنوبی منطقه بالاست و همچنین با توجه به اینکه احتمال شور و سدیمی شدن خاک ها از آب های زیرزمینی و همچنین آبیاری با این آب ها باشد، بررسی کیفیت آب های زیرزمینی و کشاورزی منطقه نیز در اجرای برنامه های مدیریتی اراضی مورد مطالعه پیشنهاد می شوند.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- خاموشی، سیدعرفان؛ سرمیدان، فریدون و امید، محمود. (۱۴۰۳). ارزیابی تناسب اراضی با استفاده از رویکردهای سنتی و مدل های یادگیری ماشینی) مطالعه موردی دشت آبیک، استان قزوین، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۲)، ۲۶۹-۲۸۳.
- دائم پناه، راضیه؛ حق نیا، غلامحسین؛ علیزاده، امین و کریمی کارویه، علیرضا. (۱۳۹۰). تهیه نقشه شوری و سدیمی خاک سطحی با روش های دورسنجی و زمین آماری در جنوب شهرستان مه ولات. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵ (۳)، ۴۹۸-۵۰۸.
- رحمانی، اصغر؛ سرمیدان، فریدون و عارفی، حسین، (۱۴۰۱). مدل سازی و پیش بینی رقومی کلاس های زیرگروه خاک با استفاده از رویکرد یادگیری

عمیق در بخشی از اراضی خشک و نیمه‌خشک دشت قزوین، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۱۰)، ۲۴۷۷-۲۴۹۹.

رسولی، لیلا؛ نبی‌اللهی، کمال؛ تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله. (۱۳۹۹). نقشه‌برداری رقومی شاخص کیفیت خاک (مطالعه موردی: قروه، استان کردستان). *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۰(۱): ۱۰۱-۱۱۸.

رضایی، گردآفرین؛ سرمیدیان، فریدون؛ محمدی ترکشوند، علی؛ سید محمدی، جواد و مرعشی علی‌آبادی، مریم. (۱۴۰۲). نقشه‌برداری رقومی تغییرات سطحی و زیرسطحی کربن آلی و شوری خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین (مطالعه موردی: مناطق آبیک و نظر آباد). *نشریه آب و خاک*، ۳۷(۲)، ۳۱۵-۳۳۱.

موسوی، سیدروح‌اله؛ سرمیدیان، فریدون؛ امید، محمود و بوگارت، پاتریک. (۱۴۰۰). مدل‌سازی رقومی تغییرات سه بعدی شوری خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در اراضی خشک و نیمه‌خشک دشت قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۷)، ۱۹۱۵-۱۹۲۹.

REFERENCES

- Abdel-Kader, F.H. (2011). Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: a multinomial logistic regression approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 14, 29-40.
- Adeniyi, O.D., Bature, H., & Mearker, M. (2024). A Systematic Review on Digital Soil Mapping Approaches in Lowland Areas. *Land*, 13(3), 379.
- Agaba, S., Ferré, C., Musetti, M., & Comolli, R. (2024). Mapping Soil Organic Carbon Stock and Uncertainties in an Alpine Valley (Northern Italy) Using Machine Learning Models. *Land*, 13(1), 78.
- Aksoy, S., Sertel, E., Roscher, R., Tanik, A., & Hamzehpour, N. (2024). Assessment of soil salinity using explainable machine learning methods and Landsat 8 images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 103879.
- Allbed, A., & Kumar, L. (2013). Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review. *Advances in Remote Sensing*, 02, 373-385.
- Beaudette, D. E., Roudier, P., & O'Geen, A. T. (2023). Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists. *Computers and Geosciences*, 52, 258-268.
- Bogaert, P., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Hamzehpour, N. (2023). Model averaging of machine learning algorithms for digital soil mapping: A minimum variance framework. *Geoderma*, 437, 116604.
- Brunner, P. H. T. L., Li, H. T., Kinzelbach, W., & Li, W. P. (2007). Generating soil electrical conductivity maps at regional level by integrating measurements on the ground and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 28(15), 3341-3361.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007.
- Daempanah, R., Haghnia, Gh.H., Alizadeh, A. & Karimi, A.R. (2011). Mapping Salinity and Sodicity of Surface Soil by Remote Sensing and Geostatistic Methods in South Side of Mah Valat County. *Journal of Water and Soil*, 25(3), 498-508. (In Persian)
- FAO., (2023). GSASmap | Global Soil Partnership | Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/gsasmap/en>
- Fathizad, H., Hakimzadeh Ardakani, M.A., Sodaiezadeh, H., Kerry, R., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forests in the central desert of Iran. *Geoderma*, 365, 114233.
- Gallant, J.C., & Dowling, T.I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resource Research*, 39, 1347-1359.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Habibi, V., Ahmadi, H., Jafari, M., & Moeini, A. (2021). Mapping soil salinity using a combined spectral and topographical index with artificial neural network. *PLoS One*, 16(5), e0228494.
- Jafari, A., Finke, P. A., Wauw, J. V., Ayoubi, S., & Khademi, H. (2012). Spatial prediction of USDA great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science*, 63, 284-298.
- Khamoshi, S.E., Sarmadian, F., & Omid, M. (2024). Land suitability evaluation using traditional and machine learning approaches: a case study in Abiek plain, Qazvin province, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(2), 269-283. (In Persian)
- Kilic, K., & Kilic, S. (2007). Spatial variability of salinity and alkalinity of a field having salination risk in semi-arid climate in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 127, 55-65.



- Krivoruchko, K., & Gribov, A. (2019). Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368.
- Kuhn, M. (2008). Caret package. *Journal of statistical software*, 28(5), 1-26.
- Liu, Y., Han, X., Zhu, Y., Li, H., Qian, Y., Wang, K., & Ye, M. (2024). Spatial mapping and driving factor Identification for salt-affected soils at continental scale using Machine learning methods. *Journal of Hydrology*, 639, 131589.
- Malone, B. (2016). Ithir: Functions and algorithms specific to pedometrics. R Package Version, 1, r126.
- Malone, B. P., McBratney, A. B., Minasny, B., & Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154(1), 138-152.
- Malone, B. P., Minasny, B., Odgers, N. P., & McBratney, A. B. (2014). Using model averaging to combine soil property rasters from legacy soil maps and from point data. *Geoderma*, 232, 34-44.
- Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B. (2018). Using R for digital soil mapping (Vol. 35). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52.
- McBride, G. B. (2005). A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's concordance correlation.
- Mohammadifar, A., Gholami, H., Golzari, S., & Collins, A. L. (2021). Spatial modelling of soil salinity: deep or shallow learning models? *Environmental Science and Pollution Research*, 1-19.
- Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2021). Digital Modeling of Three-Dimensional Soil Salinity Variation Using Machine Learning Algorithms in Arid and Semi-Arid lands of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7), 1915-1929. (In Persian)
- 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.
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P.C., & Bolan, N.S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280, 111736.
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Shahabi, A., Heung, B., Amirian-Chakan, A., Davari, M., & Scholten, T. (2021). Assessing agricultural salt-affected land using digital soil mapping and hybridized random forests. *Geoderma*, 385, 114858.
- Naimi, S., Ayoubi, S., Zeraatpisheh, M., & Dematte, J.A.M. (2021). Ground observations and environmental covariates integration for mapping of soil salinity: a machine learning-based approach. *Remote Sensing*, 13(23), 4825.
- Nield, S.J., Boettger, J.L., & Ramsey, R.D. (2007). Digital mapping gypsic and nitric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 245-252.
- Omrani, M., Shahbazi, F., Feizizadeh, B., Oustan, S., & Najafi, N. (2021). Application of remote sensing indices to digital soil salt composition and ionic strength mapping in the east shore of Urmia Lake, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100498.
- Qadir, M., Qureshi, A.S., & Cheraghi, A.M. (2008). Extent and characterization of salt affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. *Land Degrad. Dev.* 19, 214-224.
- R Development Core Team. (2022). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna Austria.
- Rahmani, A., Sarmadian, F., & Arefi, H. (2023). Digital modeling and prediction of soil subgroup classes using deep learning approach in a part of arid and semi-arid lands of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2477-2499. (In Persian)
- Rasouli, L., Nabiollahi, K., & Taghizade-Mehrjardi, R. (2020). Digital mapping of soil quality index (Case study: Ghorveh, Kurdistan Province). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 10(1), 101-118. (In Persian)
- Rezaie, G., Sarmadian, F., Mohammadi Torkashvand, A., Seyedmohammadi, J., & Marashi Aliabadi, M. (2023). Digital Mapping of Surface and Subsurface Soil Organic Carbon and Soil Salinity Variation in a Part of Qazvin Plain (Case Study: Abyek and Nazarabad Regions). *Journal of Water and Soil*. 37(2), 315-331. (In Persian)
- Richards, L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural Handbook No. 60. U.S. Salinity Laboratory Riverside, California.
- Richardson, A.J., & Wiegand, C.L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background

- information. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 43(12), 1541-1552.
- Roozitalab, M.H., Siadat, H., & Farshad, A. (Eds.). (2018). The soils of Iran. Switzerland: Springer international publishing.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A. & Benham, E.C. (2012) Soil Survey Staff. Field book for describing and sampling soils, 3rd version. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln.
- Shahrayini, E., & Noroozi, A. A. (2021). Modeling and Mapping of Soil Salinity and Alkalinity Using Remote Sensing Data and Topographic Factors.
- Soil survey manual. (2018). Soil Science Division Staff. United States Department of Agriculture Handbook No. 18.
- Soil Survey Staff. (2017). Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. Web Soil Survey. Available online at <http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/> . Accessed 04/24/2017.
- Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy. 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC.
- Sparks, D.L. (1996). Methods of Soil Analysis. Part. 3: Chemical Methods; Soil Science Society of America, American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, ISBN 978-0-89118-825-4.
- Suarez, D.L. (1981). Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Science Society of American Journal*, 45 (3), 469-475
- Sultan, M.T., Mahmud, U., & Khan, M.Z. (2023). Addressing soil salinity for sustainable agriculture and food security: Innovations and challenges in coastal regions of Bangladesh. *Future Foods*, 100260.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Ayoubi, S., Namazi, Z., Malone, B. P., Zolfaghari, A. A., & Sadrabadi, F. R. (2016). Prediction of soil surface salinity in arid region of central Iran using auxiliary variables and genetic programming. *Arid Land Research and Management*, 30(1), 49-64.
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., & Malone, B.P. (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysics Research*. 106: 7183-7192.
- Viscarra Rossel, R.A. & McBratney, A.B. (2009). Diffuse Reflectance Spectroscopy as a Tool for Digital Soil Mapping. In: Hartemink, A.E., McBratney, A., Mendonça-Santos, M.d. (eds) Digital Soil Mapping with Limited Data. Springer, Dordrecht.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., & Brun, F. (2006). Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications. Elsevier.
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X., ... & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: A comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Science of the Total Environment*, 707, 136092.
- Wang, J., Peng, J., Li, H., Yin, C., Liu, W., Wang, T., & Zhang, H. (2021). Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid areas, China. *Remote Sensing*, 13(2), 305.
- Wang, N., Chen, S., Huang, J., Frappart, F., Taghizadeh, R., Zhang, X., ..., Shi, Z., (2024). Global Soil Salinity Estimation at 10 m Using Multi-Source Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 4, 0130.
- Wilding, L.P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil survey. In D.R. Nielsen, J. Bouma (Eds.), *Soil Spatial Variability* (pp. 166-189). Pudoc.
- Wu, H., & Levinson, D. (2021). The ensemble approach to forecasting: A review and synthesis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103357.
- Yu, H., Liu, M., Du, B., Wang, Z., Hu, L., & Zhang, B. (2018). Mapping soil salinity/sodicity by using Landsat OLI imagery and PLSR algorithm over semiarid West Jilin Province, China. *Sensors*, 18(4), 1048.
- Zhang, T. T., Zeng, S. L., Gao, Y., Ouyang, Z. T., Li, B., Fang, C. M., & Zhao, B. (2011). Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 11(6), 1552-1562.