Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2026, Vol. 16(2): 81 - 99

Research Article

Evaluation of interpolation methods and resulting errors in the sabkhas adjacent to the Hur al-Azim Wetland

Kosar Abyat[1], Mostafa Kabolizadeh[1]*, Sajad Zareie[1]

1- Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

Drying of the Hur al-Azim has gradually led to the formation of adjacent sabkhas, causing economic and environmental problems in the region. To better manage these areas, accurate maps of their characteristics are needed. This study aimed to evaluate interpolation maps and examine the distribution of errors from them in the Hur al-Azim sabkhas. A research gap existed regarding error maps from interpolation methods, which guided the research approach. Eight interpolation methods were compared to create predictive maps of the physical and chemical properties of the sabkhas. Errors were then calculated to identify the most accurate model for each parameter, and an error distribution map was prepared for each parameter based on that model. The results showed that the different interpolation methods did not have the same accuracy for each parameter. The error distribution maps indicated that the error distribution for salinity, gypsum, clay, and pH was uniform across the entire area, suggesting a good model fit. However, the error distribution maps for silt, organic carbon, sodium adsorption ratio, bulk density, and moisture showed a large number of random errors in the model's output. For the $CaCO_3$ and sand parameters, the error maps indicated a quasi-systematic error in the model. These results suggest that while the proposed models were the best among the available options, they were not entirely successful in modeling these specific parameters. From a practical perspective, the results of this study indicate that the simultaneous assessment of interpolation-method accuracy and the spatial pattern of errors can facilitate the identification of areas with higher reliability and areas with higher errors. This information can be used to target supplementary sampling, improve soil maps, and support management and planning decisions in sabkha areas.

Keywords: *Error distribution, Interpolation, Sabkha, Hur al-Azim wetland.*

1-Introduction

Sabkhas are salt flats that expand in hot and arid climates. The sabkhas adjacent to the Hur al-Azim Wetland have developed due to the gradual desiccation of parts of the wetland, leading to significant economic and environmental consequences for the region. Accurate spatial information regarding the physicochemical properties of soils in these areas is essential for environmental assessment, resource management, and informed decision-making. To facilitate better management, precise mapping of the area's characteristics is required. This research aims to evaluate various interpolation methods and examine the spatial distribution of their resulting errors within the sabkhas adjacent to the Hur al-Azim Wetland. Beyond assessing overall model accuracy, analyzing the spatial patterns of interpolation errors provides critical insights into the reliability of the generated maps.

* Corresponding author: m.kabolizade@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2026.50624.2532
Received: 2025-09-14
Accepted: 2026-09-13

ISSN: 2717-0764

2-Material and methods

For this purpose, eight interpolation methods Inverse Distance Weighting (IDW), Radial Basis Functions (RBF), Global Polynomial (GP), Local Polynomial, Ordinary Kriging (OK), Simple Kriging (SK), Universal Kriging (UK), and Empirical Bayesian Kriging (EBK) were compared to produce prediction maps of the physical and chemical properties of the sabkhas in the study area. The physical and chemical properties of the studied sabkhas included salinity, gypsum, pH, CaCo3, clay, sand, silt, organic carbon, sodium adsorption ratio (SAR), bulk density, and moisture. In the next step, by calculating the Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Bias Error (MBE), the most accurate model for each criterion was identified. Finally, an error distribution map for each parameter was prepared based on that model.

3-Results and discussions

The results showed that different interpolation methods did not have uniform accuracy for each parameter. For CaCo3 and sand, the Global Polynomial (GP) model exhibited the highest accuracy compared to other methods, while Ordinary Kriging (OK) and Universal Kriging (UK) models were the most suitable for pH. In terms of moisture and bulk density, Radial Basis Functions (RBF) showed the highest accuracy compared to other models. Additionally, the Inverse Distance Weighting (IDW) method provided the best accuracy for organic carbon and silt, and for the sodium adsorption ratio, the Simple Kriging (SK) model was the most appropriate. The results from the error maps indicate that the error distribution for parameters such as salinity, gypsum, clay, and pH was uniform across the entire area, suggesting a good fit of the model to the data points. However, the error distribution maps for silt, organic carbon, sodium adsorption ratio, bulk density, and moisture showed the presence of significant random errors in the model output. For CaCo3 and sand parameters, the error outputs indicated a quasi-systematic error in the model

4-Conclusion

The results indicated that although the selected interpolation methods provided the best performance among the evaluated alternatives for the different soil properties, considerable spatial errors remained in some cases. Therefore, selecting the best interpolation method based solely on overall accuracy metrics does not necessarily imply uniform reliability of the resulting map throughout the study area, highlighting the importance of spatial analysis of interpolation errors. Error-distribution maps can help identify areas with relatively high prediction errors and can consequently support targeted supplementary sampling, improvement of soil-property maps, and more reliable environmental management and decision-making in sabkha environments.

5-References

Abyat, A., Azhdari, A., Jodaki, M., Darvish-Khatuni, J., 2017. Investigation and differentiation of Quaternary sedimentary environments in the Khuzestan Plain. Advanced Applied Geology 25, 49-64. 10.22055/aag.2017.21931.1702 (In Persian).

Bronowicka-Mielniczuk, A., Mielniczuk, J., 2023. New indices to quantify patterns of relative errors produced by spatial interpolation models – A comparative study by modelling soil properties Urszula. Ecological Indicator 154, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110551

Selmy, S., Abd El-Aziz, A., El-Desoky, M., El-Sayed., 2022.Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 21, 383-396, https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013

ISSN: 2717-0764

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Abyat, K., Kabolizadeh, M., Zareie, S., 2026. Evaluation of interpolation methods and resulting errors in the sabkhas adjacent to the Hur al-Azim Wetland. Adv. Appl. Geol. 16 (2), 81-99.
DOI: 10.22055/aag.2026.50624.2532
https://aag.scu.ac.ir/article_20934.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی روش‌های درون‌یابی و خطای حاصل از آن در سبخاهای مجاور تالاب هورالعظیم

کوثر عبیات

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مصطفی کابلی زاده

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

سجاد زارعی

گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

m.kabolizade@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲

چکیده

سبخاهای مجاور تالاب هورالعظیم در اثر خشک شدن تدریجی این تالاب تشکیل و سبب ایجاد مشکلات اقتصادی و زیست‌محیطی در این منطقه شده است. جهت مدیریت بهتر، نیاز به نقشه‌هایی دقیق از خصوصیات این منطقه می‌باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی نقشه‌های درون‌یابی و بررسی نحوه توزیع خطای حاصل از آن‌ها در سبخاهای تالاب هورالعظیم صورت گرفته است. چرا که در رابطه با نقشه‌های خطای حاصل از روش‌های درون‌یابی خلأ پژوهشی وجود داشته، بنابراین بر این اساس روش پژوهش اتخاذ گردید. برای این منظور ۸ روش درون‌یابی برای تهیه نقشه پیش‌بینی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سبخاهای منطقه مورد مطالعه، مورد مقایسه قرار گرفتند. سپس با محاسبه خطا، دقیق‌ترین مدل برای هر معیار شناسایی شد و نقشه توزیع خطای هر پارامتر براساس آن مدل تهیه گردید. نتایج حاصل نشان داد که روش‌های مختلف درون‌یابی در هر یک از پارامترها، دقت یکسانی نداشتند. همچنین نتایج حاصل از نقشه‌های توزیع خطا نشان می‌دهد که توزیع خطا در پارامترهای شوری، گچ، رس و واکنش خاک در کل منطقه رفتار یکنواخت داشته که نشان‌دهنده برازش مناسب مدل بوده است. ولی نقشه‌های توزیع خطا در سیلت، کربن آلی، نسبت جذب سدیمی، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت نشان‌دهنده وجود خطاهای اتفاقی زیاد در خروجی مدل است. در مورد پارامترهای آهک و شن نیز خروجی خطاها نشانگر وجود یک خطای شبه سیستماتیک در مدل است. این نتایج بیانگر آن است که مدل‌های پیشنهادی هرچند از میان مدل‌های موجود بهترین نتیجه را داشته‌اند ولی همچنان در مدل‌سازی این پارامترها کاملاً موفق نبوده‌اند. از جنبه‌های کاربردی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی همزمان دقت روش‌های درون‌یابی و الگوی مکانی خطا امکان شناسایی نواحی با قابلیت اطمینان بیشتر و مناطق دارای خطای بالاتر را فراهم می‌کند. این اطلاعات برای هدفمند کردن نمونه‌های تکمیلی، بهبود نقشه‌های خاک و تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی در مناطق سبخایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: *توزیع خطا، درون‌یابی، سبخا، تالاب هورالعظیم*

۱-مقدمه

سبخا (Sabkha) واژه‌ای عربی است که برای پهنه‌های نمکی به کار برده می‌شود. چنین محیط‌هایی اغلب به صورت پهنه‌های گلی خارج از آب یافت می‌شوند، اما در برخی مواقع توسط آب‌های کم‌عمق موقتی پوشیده می‌شوند. این پهنه‌ها در محیط‌هایی با آب و هوای گرم و خشک گسترش می‌یابند. تبخیر بالا سبب افزایش غلظت نمک در این محیط‌ها شده است (Abyat et al., 2019). سبخاها به دو نوع قاره‌ای و ساحلی تقسیم‌بندی می‌گردد. در سبخاها، فرآیندهایی که به عنوان مهم‌ترین عوامل شناخته می‌شوند، علاوه بر تبخیر، شامل ساحل دریا، رودخانه دریاچه‌ای و بادهای غالب می‌باشند. غالب بودن هر یک از این فرآیندها به ترتیب سبب تشکیل سبخاهای ساحلی و قاره‌ای و یا بادی می‌شود. انواع بادی می‌تواند ریز رخساره‌ای از سبخاهای قاره‌ای یا دریایی باشند (Warren, 2006). در خوزستان سبخاهای قاره‌ای به چهار دسته تقسیم می‌شوند: پلایا، سبخاهای متعلق به دشت‌های سیلابی خشک شده، سبخاهای متعلق به تالاب‌های خشک

شده و سبخاهای دریاچه‌ای شور. سبخاهای تالاب‌های خشک شده در نزدیکی تالاب هورالعظیم مشاهده می‌شوند (Abyat et al.,2017). که سبب از بین رفتن زمین‌های حاصلخیز، حساس شدن منطقه نسبت به فرسایش و تبدیل آن به کانون توفان‌های گرد و غبار شده است. جهت مدیریت بهتر این منابع و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر، نیاز به نقشه‌هایی دقیق از خصوصیات این منطقه می‌باشد (Abyat et al.,2021). در همین راستا، تهیه نقشه‌های پراکندگی با بهره‌گیری از روش‌های آمار فضایی و GIS در گرایش‌های مختلف کاربرد زیادی داشته است (Mir-Abdallahi Hasanati, and Amiri, 2022).

اهمیت مطالعه تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک به دلیل نقش آن در حل مسائل زیست‌محیطی و بهبود کشاورزی، منجر به انجام پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر شده است. درک این تغییرپذیری می‌تواند به کاهش مشکلاتی نظیر آلودگی خاک‌ها، افزایش تولیدات کشاورزی و دستیابی به اکوسیستم‌های پایدار کمک شایانی کند (Bronowicka-Mielniczuk and Mielniczuk, 2023). در همین زمینه Selmy و همکاران (۲۰۲۲) با هدف توصیف، ارزیابی و نقشه‌برداری تنوع مکانی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از روش‌های زمین‌آمار و GIS استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که نقشه‌های پیش‌بینی تولید شده اطلاعات ارزشمندی در مورد کشاورزی دقیق برای بهبود بهره‌وری خاک و کاهش محدودیت ارائه می‌دهد و پتانسیل بالایی برای کاربرد در مدیریت دارند (Selmy et al., 2022). هم‌چنین با توجه به اهمیت انتخاب روش مناسب برای نقشه‌برداری، Behnam و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آماری نظیرکریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ گسسته، کوکریجینگ و وزن‌دهی فاصله معکوس پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که روش کوکریجینگ معمولی برای کربن آلی و pH، روش کوکریجینگ ساده برای درصد رس و سیلت، روش کریجینگ ساده برای شوری خاک و روش کریجینگ معمولی برای درصد شن در مقایسه با سایر روش‌های مطالعه شده مناسب‌تر بودند (Behnam et al., 2024). با این حال، برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که روش‌های استاندارد همواره بهترین گزینه نیستند. همانند مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۰) که کاربرد روش کریجینگ معمولی را برای تخمین کربن آلی خاک (SOC) ذخیره شده در یک حوضه کارستی کوچک در چین را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دادند، نتایج آن‌ها نشان داد که روش زمین‌آماری معمول در برازش دقیق داده‌ها ناموفق بوده، در نتیجه نیاز است عواملی مانند توزیع مکانی ویژگی‌های ریزژئومورفولوژیک، برای تصحیح تخمین ذخیره SOC در مناطق کارستی استفاده شوند (Zhang et al., 2020). این موضوع نشان می‌دهد که ارزیابی دقت مدل‌های درون‌یابی و بررسی الگوهای خطا، نیازمند توجه بیشتری است. Bronowicka-Mielniczuk و Mielniczuk (۲۰۲۳) در پژوهشی تطبیقی، شاخص‌های جدیدی را برای اندازه‌گیری الگوهای خطاهای نسبی مدل‌های درونیابی توسعه دادند. این مطالعه با هدف توسعه ابزارهای جدید برای بررسی عملکرد نسبی روش‌های مختلف درون‌یابی انجام شده بود. مدل‌های درون‌یابی با استفاده از برخی شاخص‌های نابرابری توزیع خطا مقایسه شدند. در این پژوهش عنوان شده که معیارهای بررسی‌شده مکمل ارزشمندی برای ارزیابی دقت مرسوم ارائه داشته‌اند ولی تاکنون توجه کمی به آن‌ها شده است. هشت روش درون‌یابی، برای تخمین توزیع مکانی pH خاک، نیتروژن، پتاسیم و فسفر را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کریجینگ معمولی در اکثر موارد عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دیگر از خود نشان داد. الگوریتم‌های نزدیک‌ترین همسایه (NeN)، تابع پایه شعاعی (RBF) و روش اصلاح شده شپارد (MS) در مقایسه با سایر روش‌ها، شاخص‌های نابرابری نسبتاً کوچکی را کسب کردند. همچنین عنوان کردند که استفاده از معیارهای جدید پیشنهادی، به متخصصان این امکان را می‌دهد تا ارزیابی‌های جامع‌تری از تکنیک‌های درون‌یابی مکانی به دست آورند (Bronowicka-Mielniczuk and Mielniczuk, 2023). همچنین Jiang (۲۰۲۲) با هدف تخمین دقیق محتوای ماده آلی خاک (SOM) در خاک‌های مولی‌سول، مدل‌های درون‌یابی قطعی را در سه مقیاس مکانی، اعمال کردند. در این مطالعه ۱۴ متغیر محیطی و ۱۴ متغیر ویژگی خاک برای مقایسه دقت

پیش‌بینی روش‌های درون‌یابی استفاده شده بود و عملکرد مدل‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل ارزیابی گردید. کریجینگ رگرسیون(RK) و کریجینگ رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWRK) به دلیل متغیرهای کمکی، محتوای SOM را بهتر پیش‌بینی کردند و بهبود دقت پیش‌بینی آن‌ها، در مقایسه با وزن‌دهی فاصله معکوس، توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای سراسری و چندجمله‌ای محلی، به مقیاس مکانی بستگی داشت. علاوه بر این، متغیرهای ویژگی خاک (مانند نیتروژن کل و pH) تأثیر معنادارتری بر پیش‌بینی نهایی نسبت به متغیرهای محیطی (مانند ارتفاع، شیب و غیره) دارا بودند (Jiang et al., 2022).

علی‌رغم انجام مطالعات گسترده در زمینه درون‌یابی ویژگی‌های خاک، تاکنون پژوهش‌های اندکی به بررسی دقیق توزیع خطا در روش‌های مختلف درون‌یابی پرداخته‌اند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی در پارامترهای (شوری، گچ، واکنش خاک، آهک، رس، شن، سیلت، کربن آلی، نسبت جذب سدیمی، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت) سبخاهای قاره‌ای مجاور تالاب هورالعظیم صورت گرفته است. پایش تغییرپذیری مکانی این پارامترها برای مدیریت بهتر بحران‌های زیست‌محیطی، کاهش خسارات اقتصادی و کنترل فرسایش خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه حیاتی است. با توجه به چالش‌های ناشی از محدودیت داده‌ها در روش‌های درون‌یابی، تاکید این پژوهش بر ارزیابی همزمان دقت روش‌ها و الگوی توزیع خطای آن‌ها است تا امکان تهیه نقشه‌های با دقت بالاتر برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم گردد. برای این منظور روش‌های درون‌یابی قطعی (وزن‌دهی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting)، توابع پایه شعاعی (Radial Basis Function)، چندجمله‌ای سراسری (Global Polyinomial) و چندجمله‌ای محلی (Local Polyinomial) و روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری (کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging)، کریجینگ ساده (Simple Kriging)، کریجینگ عام (Universal Kriging) و کریجینگ تجربی بیزی (Empirical Bayesian Kriging) برای تهیه نقشه پیش‌بینی ویژگی‌های سبخاهای منطقه مورد مطالعه مورد مقایسه قرار گرفتند. سپس با محاسبه میزان خطا، دقیق‌ترین مدل برای هر معیار شناسایی شد. در مرحله بعد نقشه‌های توزیع خطا برای هر پارامتر در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید، برای این منظور از مناسب‌ترین مدل درون‌یابی که برای هر پارامتر بدست آمده بود، استفاده شد. نقشه‌های توزیع خطا در منطقه مورد مطالعه، در واقع تفاوت بین داده‌های خاک مرجع و داده‌های خاک پیش‌بینی شده را در تمام نقاط کنترل تخمین می‌زند، با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان نحوه توزیع خطا را در منطقه مورد مطالعه بررسی و نواقص مدل‌های مورد استفاده را بهبود بخشید.

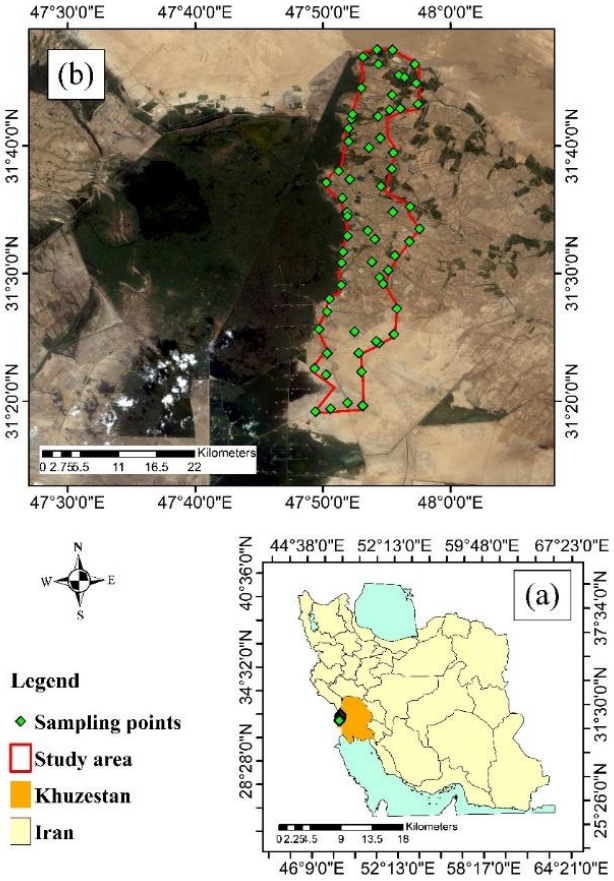
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تالاب هورالعظیم در جنوب غرب ایران، در استان خوزستان واقع شده است. این تالاب در محدوده عرض جغرافیایی ´۰۰ °۳۱ الی ´۴۵ °۳۱ شمالی و طول جغرافیایی ´۲۵ °۴۷ الی ´۵۰ °۴۷ شرقی قرار دارد (UNEP, 2001). تالاب هورالعظیم و مناطق همجوار آن از نظر اقلیمی در منطقه گرم و خشک قرار دارند. میزان بارش در این منطقه اندک و میزان تبخیر و دمای آن‌ها بسیار بالا است. با توجه به داده‌های هواشناسی بستان، که نزدیک‌ترین ایستگاه به این منطقه بوده است، میانگین تبخیر سالانه در منطقه مورد مطالعه معادل ۳۶۴۱ میلی‌متر می‌باشد. میانگین بارش سالانه برابر ۱۶۰/۵۸میلی‌متر و همچنین متوسط دمای این منطقه ۲۵/۶ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثر دما ۳۶/۹ درجه و میانگین حداقل دما ۱۱/۴ درجه می‌باشد.

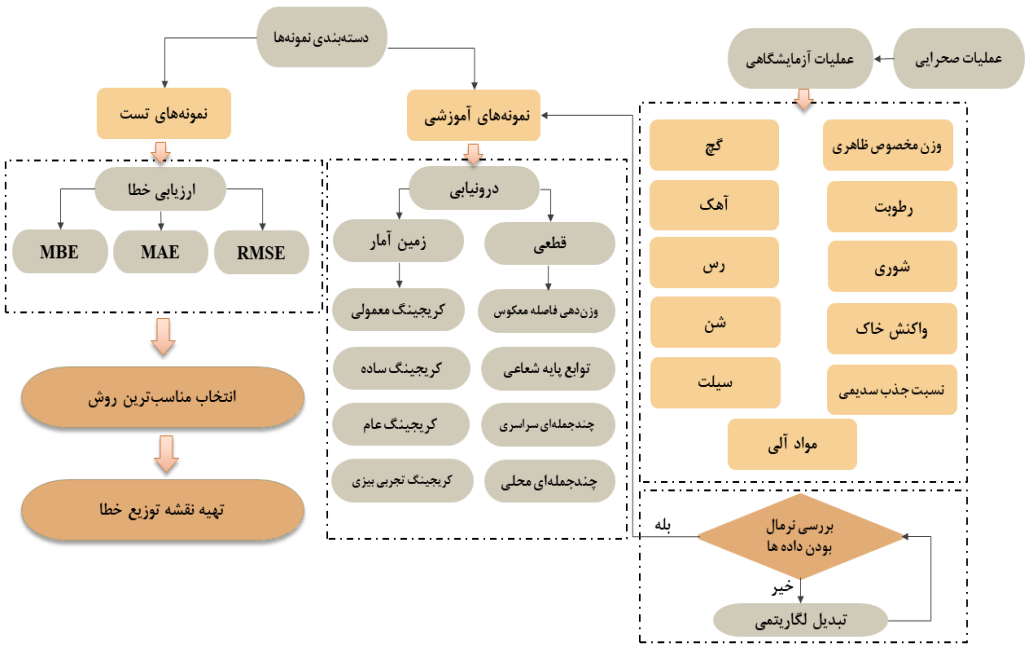
خوزستان با توجه به موقعیت خود در سواحل خلیج فارس، دمای بالای محیط و نیز عمق کم و شوری زیاد آب‌های زیرزمینی، دارای شرایط مناسب جهت تشکیل سبخاهای قاره‌ای و ساحلی است. سبخاهای قاره‌ای در مجاورت تالاب هورالعظیم و در بخش جنوبی آن، مشاهده می‌شوند. این سبخاها، در اثر خشک شدن تدریجی و کاهش مساحت تالاب و طی فرآیند موبینگی، تشکیل و گسترش یافته‌اند (Abyat et al., 2017). شکل ۱ موقعیت و محدوده منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

مراحل انجام پژوهش به صورت خلاصه در شکل ۲ نمایش داده شده است که در ادامه هرکدام توضیح داده می‌شود.



شکل۱- (a) موقعیت منطقه موردمطالعه و (b) نقاط نمونه‌برداری شده بر روی تصویر لندست ۸.

Fig 1. (a) Location of the study area, and (b) sampling points on the Landsat 8.



شکل۲- فلوچارت مراحل انجام پژوهش

Fig 2. Flowchart of research steps

۲-۲- عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

در این پژوهش ۶۴ نمونه میدانی اخذ گردید و روش برداشت این نمونه‌ها برای افزایش دقت به صورت تصادفی و مرکب (ترکیبی از سه نمونه) برداشت شده است، این نمونه‌ها از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری خاک و در مهر ماه سال ۱۳۹۶ برداشت گردید. پراکندگی نمونه‌ها به گونه‌ای است که سطح منطقه مطالعاتی را به صورت یکنواخت پوشش می‌دهند. همچنین برای شناسایی موقعیت دقیق نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه از GPS استفاده گردید. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

۲-۳- تجزیه‌های آزمایشگاهی نمونه‌ها

پس از جمع‌آوری نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی شیمیایی، نمونه‌ها هواخشک شده و پس از کوبیدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها به شرح زیر که در جدول (۱) عنوان شده است، اندازه‌گیری شد. آنالیزهای مورد نیاز در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام گرفته شد.

۲-۴- درون‌یابی

به منظور بررسی الگوی گسترش مکانی یا توزیع مکانی پدیده‌ها، از روش درون‌یابی قطعی و زمین‌آماری استفاده می‌شود. روش‌های درون‌یابی قطعی بیشتر بر روابط هندسی مانند فاصله بین پدیده استوار است و روش‌های زمین‌آمار توزیع و ساختار فضایی مکانی پدیده‌ها را در نظر می‌گیرد (Dargahian et al., 2020). روش‌های که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند، شامل روش قطعی، وزن‌دهی فاصله معکوس، توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای سراسری و چندجمله‌ای محلی، همچنین روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری که عبارتند از: کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ عام و کریجینگ تجربی بیزی، نیز استفاده گردید. برای این منظور از نرم‌افزار Arc GIS استفاده شده است. روش‌های مورد استفاده در ادامه به طور مختصر شرح داده خواهند شد.

۲-۴-۱- روش‌های قطعی

هدف از روش‌های قطعی ایجاد یک سطح برآورد از نقاط اندازه‌گیری براساس میزان شباهت و یا درجه نرم شدگی (Smoothing) است. روش‌های قطعی به دو دسته روش‌های دقیق و غیردقیق دسته‌بندی می‌شوند. در روش‌های دقیق مقادیر تخمینی مشابه مقادیر نمونه‌برداری می‌باشد مانند وزن‌دهی فاصله معکوس و توابع پایه شعاعی، ولی روش‌های غیردقیق به روش‌هایی گفته می‌شود که مقادیر تخمینی با مقادیر نمونه‌برداری متفاوت است. روش‌های چندجمله‌ای معکوس و چندجمله‌ای محلی جز روش‌های غیردقیق می‌باشند (Khosravi and Abbasi, 2016).

جدول۱- آنالیزهای آزمایشگاهی داده‌های خاک و روش‌های مورد استفاده

Table 1. Laboratory Analyses of Soil Data and Methods Employed

Analyses	Method
SAR	Sodium: Determined by flame photometry, Calcium and Magnesium: Determined by titration with 0.1 N Versene(Lanyon and Hartge, 1982)
Gyps	Precipitate Formation in acetone (Nelson,1982)
$CaCo_3$	Titration Performed with 0.25 N NaOH (Page et al., 1982)
ρb	Utilized standard cylinders (Blake and Hartge,1986)
pH	Obtained from saturated paste extract (Rhoades,1996)
OC	using the Walkley-Black method (Walakly and Black,1934)
EC_e	Measured in the saturated paste extract using a conductivity meter and expressed in dS/m(Rhoadez,1996)
Θ_m	Drying the sample in an oven at 105°C for 24 hours
Sand, Silt, Clay	Hydrometry method

۲-۴-۱-۱- وزن‌دهی فاصله معکوس

در روش وزن‌دهی فاصله معکوس، وزن نقاط نمونه بر روی نقطه نامعلوم براساس فاصله بین نقاط نامعلوم محاسبه می‌شود که توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود. در واقع در این روش فقط فاصله‌ها اهمیت دارد و موقعیت و آرایش نقاط تاثیری نخواهد داشت (Kabolizadeh et al., 2023; Asghari Saraskanroud et al., 2021).

۲-۴-۱-۲- توابع پایه شعاعی

در این روش سطح برازش داده شده از تمامی نقاط مشاهده‌ای عبور می‌کند. تفاوت این روش با وزن‌دهی معکوس فاصله این است که در این روش مقادیر بیش از حداکثر و یا کمتر از حداقل مقادیر مشاهده‌ای در سطح تخمین وجود دارند (Asghari Saraskanroud et al., 2021).

۲-۴-۱-۳- چندجمله‌ای سراسری

این روش در صورتی که تغییرات در درون نقاط نمونه برداری شده شدید نباشد، مناسب می‌باشد. هم‌چنین چندجمله‌ای سراسری به داده‌های پرت نیز حساس است و نتایج آن یک سطح ریاضی هموار می‌باشد. در این روش امکان نمایش روندهای تدریجی در سطح وجود دارد (Kabolizadeh et al., 2023).

۲-۴-۱-۳- چندجمله‌ای محلی

در صورتی که تغییرات محلی در بین نقاط نمونه‌برداری شده شدید باشد، چند جمله‌ای محلی مناسب است. این روش به فاصله همسایگی حساس می‌باشد. همچنین در این روش چندین تابع چندجمله‌ای با درجات مختلف به نقاطی که در یک همسایگی هستند، برازش می‌شود. درنتیجه سطوحی با دقت بالاتری ارائه می‌دهد (Asghari Saraskanroud et al., 2021).

۲-۴-۲- روش‌های زمین‌آماری

روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری ابزاری مناسب برای تجزیه‌وتحلیل ساختار تنوع مکانی، تعامل بین مشاهدات نقطه‌ای و ایجاد نقشه‌های درون‌یابی همراه با خطای مرتبط است (Kabolizadeh et al., 2023). این روش‌ها یک شیوه‌ی قدرتمند برای مطالعه الگوی مکانی و تغییرپذیری خصوصیات خاک است. در روش‌های زمین‌آماری، با استفاده از نقاط نمونه‌برداری شده می‌توان تخمینی از مقدار آن پارامتر در مکان‌هایی که نمونه‌برداری نشده است، انجام داد. هم‌چنین واریانس خطا را می‌توان با این روش برآورد نمود (Selmy et al., 2022). جهت توصیف نحوه تغییرپذیری مکانی داده‌ها در زمین‌آمار از واریوگرام یا تغییرنما استفاده می‌شود. واریوگرام دارای سه مولفه مهم می‌باشد: دامنه تاثیر (Range of Influence)، سقف یا آستانه (Sill) و اثر قطعه‌ای (Nugget Effect). دامنه تأثیر، فاصله‌ای است که در آن نمودار واریوگرام به تدریج افزایش یافته و به حالت افقی (ثابت) نزدیک می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده محدوده‌ای است که در آن همبستگی مکانی معناداری بین نمونه‌ها وجود دارد. دامنه تاثیر بزرگتر بر گستردگی پیوستگی مکانی دلالت دارد. سقف یا آستانه، مقداری ثابت است که نمودار واریوگرام پس از طی کردن دامنه تأثیر به آن می‌رسد و دیگر افزایش نمی‌یابد. مقدار آستانه برابر با کل واریانس (تغییرپذیری)کل داده‌های نمونه‌برداری شده است. در برخی موارد، ممکن است نمودار واریوگرام تمایل به رسیدن به یک سطح ثابت را ندارد، این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود روند ایستا در داده‌ها است. اثر نقطه‌ای، این پارامتر مقدار واریوگرام در نقطه مبدأ را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل، این مقدار باید صفر باشد. اما در واقعیت، معمولاً مقدار اثر نقطه‌ای بزرگتر از صفر است و نشان‌دهنده این است که بخش بزرگی از تغییرات متغیر، تصادفی و فاقد ساختار مکانی هستند (Khosravi and Abbasi, 2016).

۲-۴-۲-۱-کریجینگ معمولی

کریجینگ معمولی یک درون‌یابی زمین‌آماری براساس واریانس وابسته به مکان می‌باشد و از آن برای پیدا کردن بهترین برآورد بی‌طرفانه خطی استفاده می‌شود (Kabolizadeh et al., 2023).

۲-۴-۲-۲-کریجینگ ساده

کریجینگ ساده یک تخمینگر به شکل ترکیب خطی وزن‌دار به شمار می‌رود (Fotouhi Firouzabad and Maleknejad, 2020) و معمولاً در شرایطی که اطلاعات قبلی در مورد میانگین وجود داشته باشد، کاربرد دارد (Khosravi and Abbasi, 2016).

۲-۴-۲-۳-کریجینگ عام

زمانی که در داده‌ها روند وجود داشته باشد، تخمینگرهای غیرخطی نظیر کریجینگ عام کاربرد دارند. بدین صورت که روند موجود در داده‌ها شناسایی و از داده‌ها حذف می‌شود و تخمین براساس باقیمانده داده‌ها انجام می‌گیرد. در آخر مقادیر روند حذف شده با مقادیر تخمینی جمع می‌شوند (Khosravi and Abbasi, 2016).

۲-۴-۲-۴-کریجینگ تجربی بیزی

در این روش برای دستیابی به نتایج دقیق، نیازی به تنظیم دستی پارامترها نیست، زیرا در روش کریجینگ تجربی بیزی این پارامترها در حین فرآیند شبیه‌سازی به صورت خودکار محاسبه می‌شوند. تفاوت دیگر آن با سایر روش‌های کریجینگ این است که، در این روش خطاهای مربوط به برآورد نیم تغییرنما نیز در نظر گرفته می‌شود (Farnia et al., 2018).

۲-۵- ارزیابی خطا

دقت عملکرد پیش‌بینی نقشه‌های تولید شده با استفاده از اعتبارسنجی متقابل (Cross Validation) ارزیابی می‌شود. مدل‌های مورد استفاده با مقایسه متقابل مقادیر خطاهای احتمالی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مقادیر خطای پیش‌بینی محاسبه‌شده امکان تعیین این بحث را می‌دهد که آیا مدل برای نمایش و نقشه‌برداری تغییرپذیری مکانی هر ویژگی خاک مناسب است یا خیر (Selmy et al., 2022).

۲-۵-۱- خطای میانگین قدرمطلق خطا

مقدار صفر این خطا نشان‌دهنده صحت ۱۰۰ درصد و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است. رابطه شماره ۱ نحوه محاسبه این خطا را نشان می‌دهد:

$$\boldsymbol{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}|Z^*(x_i)-Z(x_i)|}{n}$$ رابطه (۱)

۲-۵-۲- میانگین انحراف خطا

این معیار در واقع اختلاف بین مقدارهای مشاهده‌ای و تخمینی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. مقدار آن می‌تواند مثبت یا منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد بیشتر (مثبت) و یا کم‌تر (منفی) از میانگین داده‌ها می‌باشد. رابطه شماره ۲، معادله این معیار را نمایش می‌دهد:

$$\mathbf{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i)-Z(x_i))}{n}$$ رابطه(۲)

در این رابطه، Z^* مقدار مشاهده شده است، Z مقدار درون‌یابی شده و n تعداد نقاط درگیر در مقایسه است.

۲-۵-۳- انحراف مربع میانگین

هر اندازه مقادیر RMSE به صفر نزدیکتر باشند، نشان‌دهنده آن است که مدل برازش داده شده دارای عمکرد بهتری است. رابطه شماره ۳ طریقه محاسبه مقدار RMSE را نشان می‌دهد (John et al., 2021):

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Z^*(x_i)-Z(x_i))^2}{n}}$$ رابطه(۳)

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش برای تهیه نقشه پیش‌بینی خصوصیات فیزیکوشیمیایی سبخاهای منطقه مورد مطالعه، روش‌های درون‌یابی(وزن‌دهی فاصله معکوس، توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای سراسری و چندجمله‌ای محلی، کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ عام و کریجینگ تجربی بیزی) مورد بررسی قرار گرفت. بدین جهت تعداد داده‌های مورد استفاده که ۶۴ نمونه می‌باشد، به دو دسته تقسیم‌بندی گردید. ۵۰ نمونه به عنوان نمونه‌های آموزشی و برای ساخت نقشه‌های درون‌یابی مورد استفاده قرار گرفت و ۱۴ نمونه به عنوان داده‌های تست برای بررسی دقت نقشه‌های تولید شده استفاده گردید.

در تجزیه‌وتحلیل زمین‌آماری، روش‌های کریجینگ زمانی کاربرد دارند که داده‌ها تقریباً به طور نرمال توزیع شده باشند. درنتیجه، ابتدا نرمال بودن داده‌ها بررسی شد، برای این منظور از نمودار Q-Q plot و هیستوگرام استفاده گردید. همچنین توصیف آماری که شامل میانگین، میانه، مد، واریانس، چولگی، کشیدگی، حداقل و حداکثر در خصوصیات سبخاهای مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۲). بررسی‌ها نشان داد که برخی از خواص خاک مورد مطالعه مانند کربن‌آلی، نسبت جذب سدیمی، رطوبت وزنی و شوری از توزیع نرمال دور بودند، درنتیجه از تبدیل log برای نرمال‌سازی آن‌ها استفاده شد.

جدول۲-توصیف آماری پارامترهای خاک منطقه مورد مطالعه

Table 2. Statistical Characterization of Soil Parameters in the Study Area

	ρb(gr/cm³)	Θ_m (%)	pH	EC_e (ms)	$CaCO_3$ (%)	Clay	Silt	Sand	Gyps (%)	OC (%)	SAR $(mmol/lit)^{0/5}$
Mean	1.25	12.87	7.18	144.99	37.35	21.02	45.46	33.51	1.85	1.79	59.15
Median	1.26	8.07	7.24	137.00	38.60	18.50	41.50	33.25	1.83	1.63	45.21
Mode	1.26	4.34	7.00	6.02[a]	34.50[a]	11.50[a]	38.50[a]	40.00	0.00	1.05[a]	10.07[a]
Variance	.036	167.54	.04	12179.8	41.20	112.59	154.91	285.74	2.11	0.60	3104.7
Skewness	-15.3	1.40	-.537	2.55	-.72	0.82	1.19	-0.002	0.06	0.92	3.93
Kurtosis	0.07	1.72	-.224	8.68	1.00	0.06	1.37	-1.01	-1.39	1.31	21.61
Minimum	0.83	0.88	6.70	6.02	16.93	6.00	26.0	3.50	0.00	0.50	10.07
Maximum	1.68	60.03	7.63	199.4	48.00	50.00	84.	62.00	3.86	4.40	398.5

بعد از نرمال سازی داده‌ها، نقشه‌های درون‌یابی برای هر پارامتر تهیه گردید و با محاسبه مقدار خطای RMSE, MAE و MBE برای هر مدل، مناسب‌ترین روش برای هر پارامتر مشخص گردید. نقشه‌های حاصل در شکل (۸) و جدول ارزیابی خطا در جدول (۳) نمایش داده شده است. همان‌طور این نتایج نشان می‌دهد، در پارامترهای آهک و شن مدل چندجمله‌ای سراسری (GP) بالاترین دقت را در مقایسه با روش‌های دیگر داشته است. با توجه به این که تغییرات در درون این پارامترها شدید نمی‌باشد، در نتیجه مدل چندجمله‌ای سراسری مناسب‌تر عمل کرده است (Asghari Saraskanroud et al., 2021). مدل‌های کریجینگ معمولی (OK) و کریجینگ عام (UK) در واکنش خاک (pH) مناسب‌ترین مدل بوده‌اند، که احتمالاً به دلیل وجود روند کلی در توزیع این پارامتر می‌باشد (Khosravi and Abbasi, 2016). شکل۳ نیم‌تغییرنما در پارامتر pH را نمایش می‌دهد. برای ارزیابی همبستگی مکانی میان داده‌های اندازه‌گیری شده و بررسی روش‌های مدل‌سازی از منحنی سمی واریوگرام یا نیم‌تغییرنما استفاده گردید.

در رطوبت وزنی و وزن مخصوص ظاهری، روش توابع پایه شعاعی (RBF) بالاترین دقت را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. دقت روش‌های مختلف درون‌یابی در وزن مخصوص ظاهری اختلاف چندانی نداشته است، ولی مدل RBF با اختلاف جزئی بهترین بوده است. تغییرات مکانی نسبتا یکنواخت در فواصل کوتاه سبب برتری این مدل نسبت به سایر مدل‌ها در این پارامتر شده است (Khosravi and Abbasi, 2016). مدل کریجینگ تجربی بیزی (EBK) مناسب‌ترین مدل برای پارامترهای رس، شوری و گچ بوده است که کمترین میزان خطا را در مقایسه با روش‌های دیگر داشته است که به دلیل توانایی EBK در مدل‌سازی ناهمگنی‌های محلی و الگوهای پیچیده می‌باشد. نیم تغییرنما در روش EBK با دیگر روش‌های کریجینگ متفاوت می‌باشد. در EBK پارامترهای تغییرنما با روش REML برآورد می‌گردد. در این روش داده‌های ورودی به زیرمجموعه‌های دارای هم‌پوشانی تقسیم می‌گردد و در هر زیر مجموعه نیم تغییرنما براساس فرآیندهای زیر برآورد می‌شود:

۱. برای هر زیر مجموعه یک نیم‌تغییرنما از داده‌های آن زیرمجموعه محاسبه می‌شود.

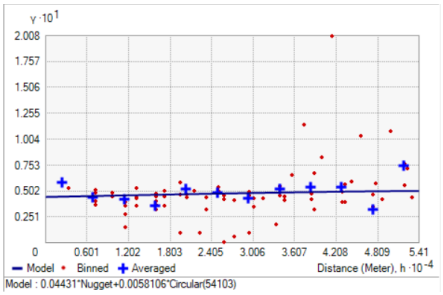
۲. با استفاده از نیم‌تغییرنمای برآورد شده در مرحله قبل، مجموعه جدیدی از داده‌ها به صورت تصادفی شبیه‌سازی می‌شوند.

۳. یک نیم‌تغییرنمای جدید براساس داده‌های شبیه‌سازی شده برآورد می‌شود.

۴. دو مرحله قبل در چند تعداد تکرار می‌شوند. در هر تکرار نیم‌تغییرنمای برآورد شده در مرحله اول برای شبیه‌سازی یک مجموعه داده در موقعیت مکانی مورد

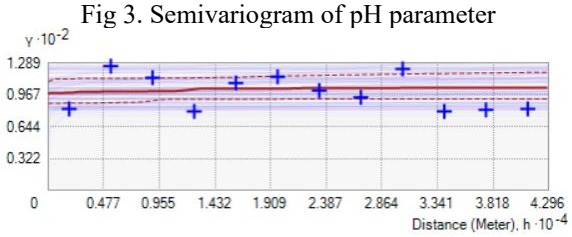
استفاده قرار می‌گیرد.ی جدید در جدید در موقعیت مکانی مورد استفاده قرا می‌گیرد.

در نهایت برای هر زیر مجموعه تعداد زیادی نیم‌تغییرنما تهیه می‌شود که اگر بروی یک نمودار رسم شوند حاصل یک توزیع از نیم‌تغییرنماها می‌باشد که محدوده تغییر آن‌ها به صورت سایه‌دار نمایش داده می‌شود. شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نیم‌تغییرنما در پارامترهای رس، شوری و گچ را نشان می‌دهد. خط قرمز پررنگ، حد وسط خطوط و دو خط چین قرمز رنگ نشان می‌دهند که ۲۵ درصد و ۷۵ درصد از نیم‌تغییرنماهای تجربی در این موقعیت می‌باشند (Farnia et al., 2018).



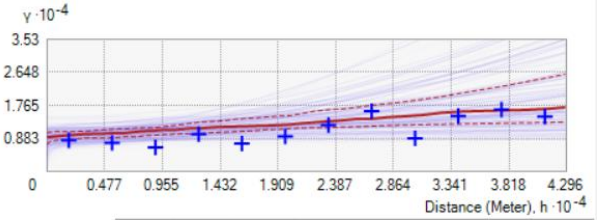
شکل۳- نیم تغییرنمای پارامتر pH

Fig 3. Semivariogram of pH parameter



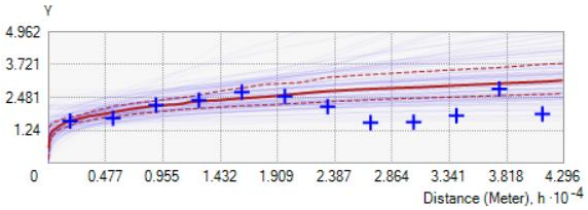
شکل۴- نیم‌تغییرنما در پارامتر رس

Fig 4. Semivariogram of clay parameter



شکل۵- نیم‌تغییرنما در پارامتر شوری

Fig 5. Semivariogram of Ec parameter



شکل۶- نیم‌تغییرنما در پارامتر گچ

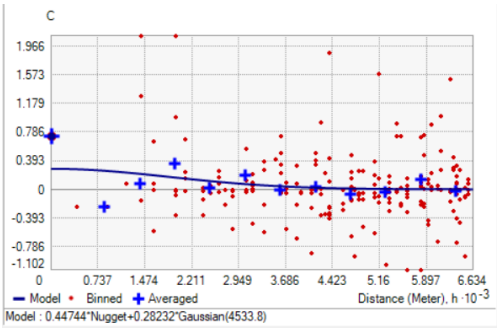
Fig 6. Semivariogram of gyps parameter

همچنین روش وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) در مواد آلی و سیلت بالاترین دقت را دارد و در نسبت جذب سدیمی مدل کریجینگ ساده (SK) مناسب‌ترین مدل بوده است، البته روش کریجینگ تجربی بیزی (EBK) اختلاف کمی نسبت به مدل کریجینگ ساده داشته است. شکل ۷ مدل نیم تغییرنما برای نسبت جذب سدیمی را نشان می‌دهد.

این نتایج نشان می‌دهد که روش‌های مختلف درون‌یابی در هر یک از پارامترها، دقت متفاوتی داشتند، در نتیجه ارزیابی روش‌های مختلف برای منطقه مورد مطالعه ضروری می‌باشد. همان‌طور که سالاری‌فر (۲۰۲۲) در پژوهشی عنوان کردند پارامترهای متفاوت نیازمند روش‌های مختلف می‌باشند و نمی‌توان جهت پهنه‌بندی پارامترهای متفاوت تنها از یک روش استفاده کرد. همچنین روش‌های درون‌یابی، بسته به نوع متغیر و ویژگی‌های منطقه، تراکم نقاط اندازه‌گیری و نحوه آرایش آن‌ها دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند و نمی‌توان نتایج یک منطقه را به راحتی به منطقه‌های دیگر تعمیم داد (Salarifar, 2022).

دقت اکثر نقشه‌های خاک به دلیل ویژگی پیوسته آن‌ها، پایین است. در صورتی که برای تصمیم‌گیری مدیریتی نیاز به نقشه‌هایی دقیق از تغییرپذیری مکانی خاک‌ها است (Osat et al., 2021). بنابراین برای بررسی نحوه توزیع مکانی نیاز به مدل‌های درون‌یابی با دقت بیشتری است. Timourzadeh و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی عنوان کردند که همه مدل‌های درون‌یابی ممکن است دارای مقداری خطا باشند، در نتیجه شناسایی منطقه نباید فقط به نتایج درون‌یابی متکی بود. بدین جهت نقشه خطا برای هر پارامتر در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید، برای این منظور از مناسب‌ترین مدل درون‌یابی برای هر پارامتر (براساس نتایج حاصل از جدول ۳) استفاده شد. نقشه‌های توزیع خطا در منطقه مورد مطالعه، درواقع تفاوت بین داده‌های خاک مرجع و داده‌های خاک پیش‌بینی شده را در تمام نقاط کنترل تخمین می‌زند. نقشه‌های حاصل در شکل (۹) نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده از توزیع خطا در ویژگی‌های مختلف سبخاهای مورد مطالعه کاملاً متفاوت است. نقشه توزیع خطا در برآورد پارامترهای شوری، گچ، رس و واکنش خاک (Ec، Gyps، Clay و PH) در کل منطقه یک رفتار یکنواخت داشته است. این رفتار نشان‌دهنده برازش مناسب مدل مورد استفاده به نقاط بوده است و به نحوی یک خطای ثابت را نشان می‌دهد. رفتار خطا به گونه‌ای است که شاید به توان جهت کاهش آن یک مقدار ثابت را از کل مدل کم کرده و یا به آن اضافه نمود. توزیع خطا در پارامترهای سیلت، کربن آلی، نسبت جذب سدیمی، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت (Silt، OC، SAR، ρb و Θm) نشان‌دهنده وجود خطاهای اتفاقی زیاد در خروجی مدل است. این امر بیانگر آن است که مدل‌های پیشنهادی هر چند از میان مدل‌های موجود بهترین نتیجه را داشته‌اند ولی همچنان در مدل‌سازی این پارامترها کاملاً موفق نبوده‌اند و لذا نیاز به توسعه روش‌های نوین در مدل‌سازی چنین پارامترهایی وجود دارد. در مورد پارامترهای آهک و شن (Sand و CaCo3) نیز خروجی خطاها نشانگر وجود یک خطای شبه سیستماتیک در مدل است. از این شکل‌ها می‌توان چنین نتیجه گرفت که با بهبود مدل مورد استفاده شاید بتوان نتایج را تا حد زیادی بهبود داده و پراکنش خطا را از حالت سیستماتیک خارج نمود.

نقشه‌های توزیع خطا در پارامترهای مختلف، بخش‌هایی با مقدار خطای بالا و میزان قطعیت پایین را به صورت مکانی برای هر ویژگی سبخا نشان می‌دهند. در نتیجه با استفاده از این نقشه‌ها می‌توان نواحی که نتایج آن قابل اطمینان‌تر است را شناسایی و در بخش‌هایی که میزان خطا بالا می‌باشد، تعداد نمونه‌ها را افزایش داد. این نقشه‌ها همراه با نقشه‌های اصلی برای مدیریت بهتر این مناطق ضروری است و سبب افزایش کیفیت مدل‌سازی می‌شوند.



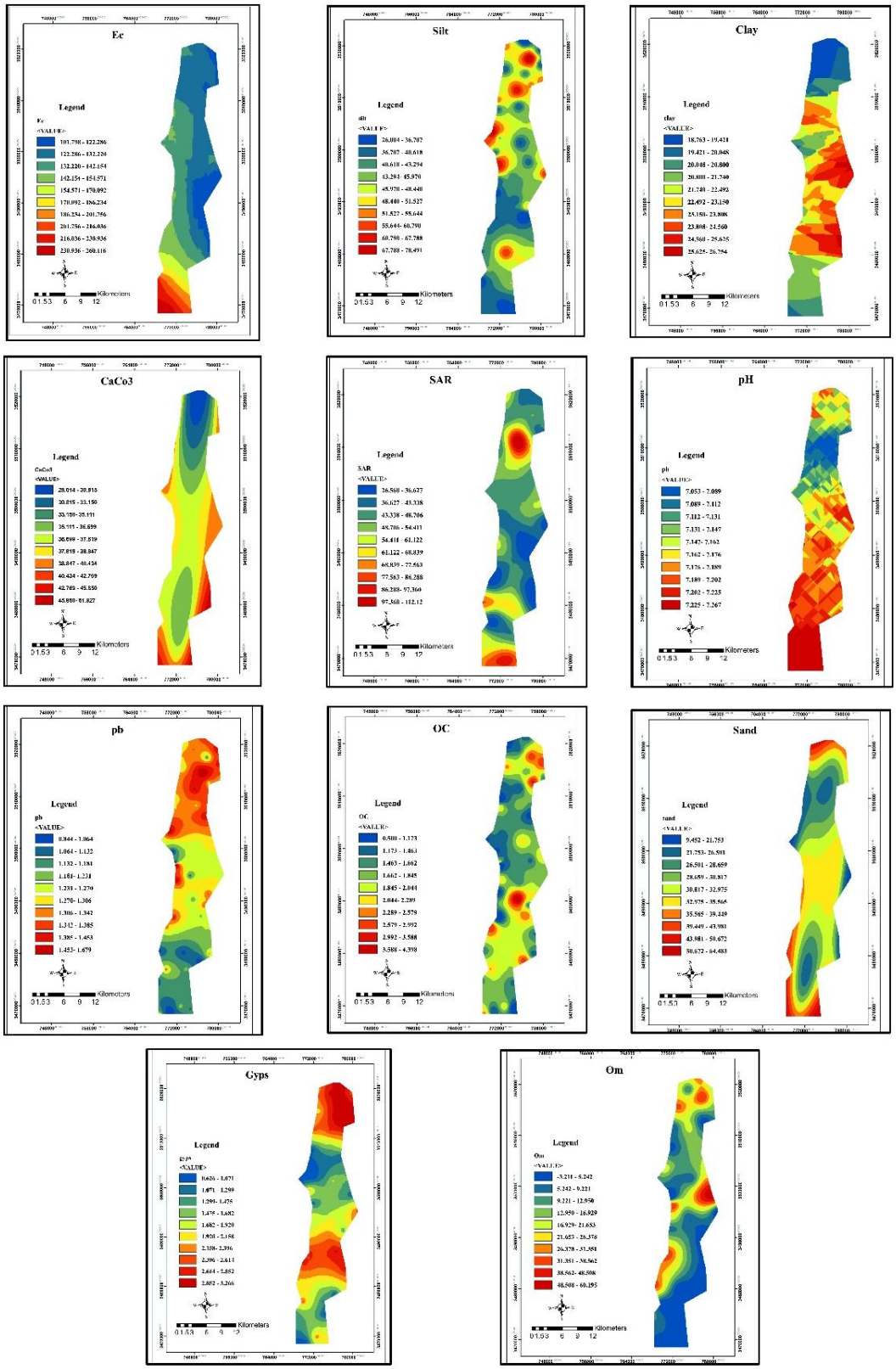
شکل۷- نیم‌تغییرنما در پارامتر نسبت جذب سدیمی
Fig 7. Semivariogram of SAR parameter

جدول۳- خطای حاصل از نقشه‌های درون‌یابی پارامترهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 3. Interpolation error of soil parameter maps in the study area.

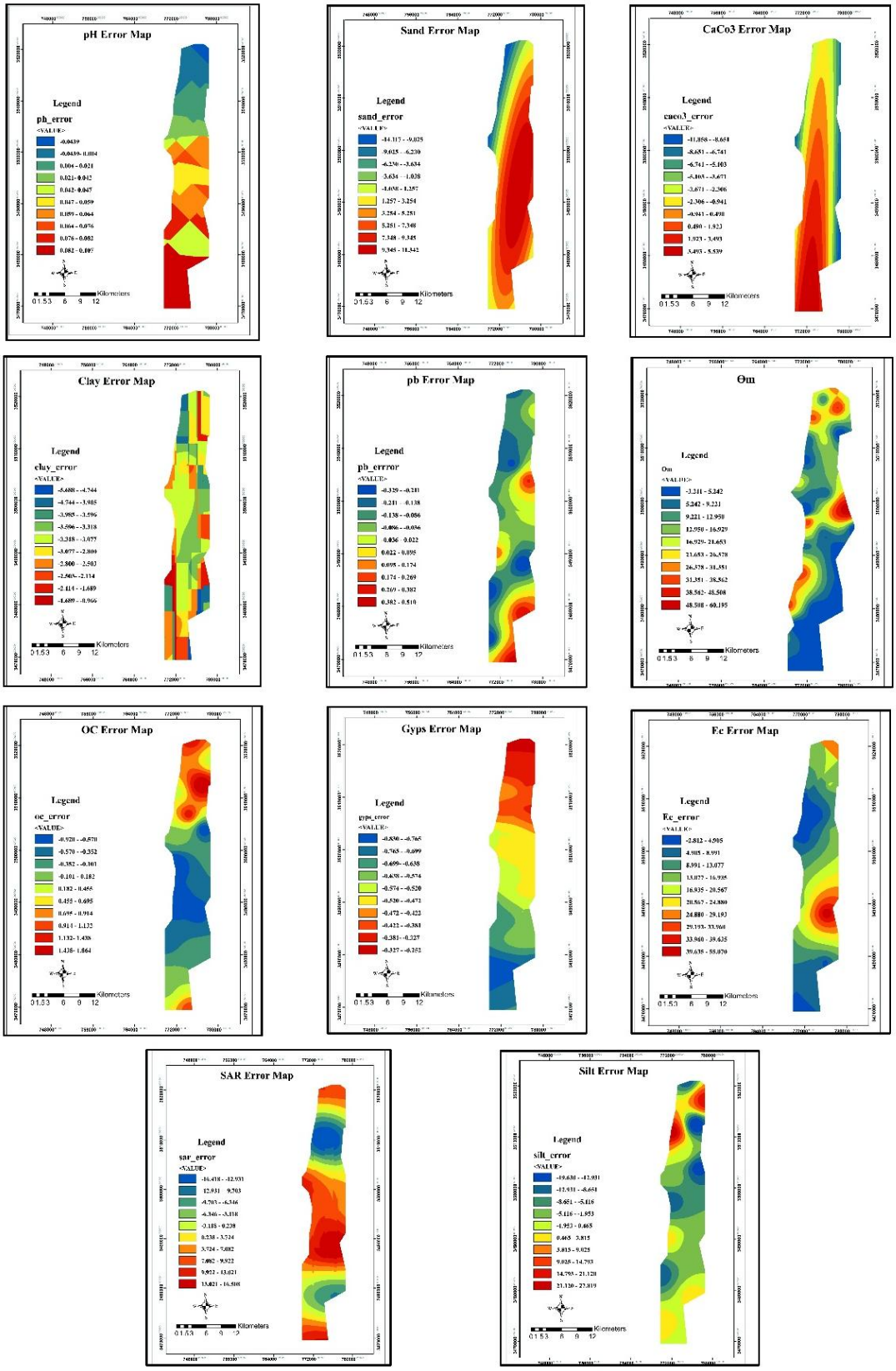
پارامتر	روش‌های درون‌یابی	RMSE	MAE	MBE	بهترین مدل	پارامتر	روش‌های درون‌یابی	RMSE	MAE	MBE	بهترین مدل
آهک	IDW	7.53	5.32	-2.16	GP	وزن مخصوص ظاهری	IDW	0.27	0.23	-0.02	RB
	GP	7.51	5.72	-1.58			GP	0.27	0.24	-0.07	
	RBF	7.63	5.41	-2.17			RBF	0.26	0.22	-0.03	
	LP	7.62	5.74	-1.74			LP	0.26	0.23	-0.05	
	OK	7.98	5.80	-2.13			OK	0.26	0.23	-0.05	
	SK	8.65	6.45	-2.28			SK	0.26	0.22	-0.06	
	UK	7.98	5.80	-2.13			UK	0.27	0.23	-0.06	
	EBK	8.20	6.07	-2.28			EBK	0.26	0.23	-0.06	
واکنش خاک	IDW	0.24	0.20	0.07	OK, UK	گچ	IDW	1.39	1.21	-0.56	EBK
	GP	0.22	0.19	0.05			GP	1.64	1.37	-0.66	
	RBF	0.24	0.20	0.06			RBF	1.35	1.12	-0.53	
	LP	0.22	0.19	0.04			LP	1.31	1.07	-0.60	
	OK	0.17	0.16	0.04			OK	1.28	1.01	-0.4	
	SK	0.2	0.16	0.03			SK	1.32	1.13	-0.51	
	UK	0.17	0.16	0.04			UK	1.28	1.01	-0.49	
	EBK	0.19	0.15	0.03			EBK	1.23	1.01	-0.52	
رطوبت وزنی	IDW	7.83	6.13	0.12	RBF	رس	IDW	14.59	12.38	-2.70	EBK
	GP	7.38	6.38	-2.29			GP	11.95	9.57	-2.42	
	RBF	6.85	5.54	-0.31			RBF	12.72	10.71	-3.83	
	LP	8.57	7.12	-1.55			LP	11.95	9.81	-2.71	
	OK	8.06	5.91	0.52			OK	12.92	10.92	-3.39	
	SK	7.58	6.15	-1.09			SK	12.62	10.56	-1.96	
	UK	12.77	9.17	3.33			UK	13.17	11.14	-3.5	
	EBK	8.24	6.64	-0.58			EBK	11.80	10.07	-3.44	
شوری	IDW	133.58	85.82	8.80	EBK	شن	IDW	19.64	16.06	4.32	GP
	GP	133.04	75.93	10.91			GP	18.38	14.78	2.61	
	RBF	132.75	83.94	10.73			RBF	21.24	16.75	3.88	
	LP	133.56	79.96	13.36			LP	20.54	16.79	2.46	
	OK	141.63	85.32	21.83			OK	20.80	16.94	4.07	
	SK	141.63	86.29	42.93			SK	20.61	16.75	4.70	
	UK	138.25	88.93	47.07			UK	20.55	17.99	5.22	
	EBK	129.93	76.31	11.98			EBK	20.28	17.48	4.80	
مواد آلی	IDW	0.88	0.72	0.16	IDW	سیلت	IDW	12.98	9.63	-1.66	IDW
	GP	0.92	0.73	0.27			GP	14.23	10.67	-0.18	
	RBF	0.90	0.74	0.20			RBF	13.89	10.18	-1.20	
	LP	0.92	0.75	0.25			LP	14.05	10.48	-0.11	
	OK	0.90	0.66	0.33			OK	13.50	10.22	-1.33	
	SK	0.95	0.71	0.34			SK	14.24	10.30	-0.88	
	UK	0.91	0.67	0.34			UK	15.43	11.80	-0.30	
	EBK	0.92	0.70	0.20			EBK	15.39	11.94	-1.40	
نسبت جذب سدیمی	IDW	39.71	30.09	-10.68	SK, EBK						
	GP	43.08	32.37	-13.97							
	RBF	40.97	31.74	-11.57							
	LP	41.23	30.50	-13.95							
	OK	33.91	26.99	-2.53							
	SK	30.23	24.49	3.15							
	UK	33.91	26.99	-2.53							
	EBK	30.24	24.19	-4.64							

IDW= Inverse Distance Weighting
GP= Global Polyinomial
RBF= Radial Basis Function
LP= Local Polyinomial
OK= Ordinary Kriging
SK= Simple Kriging
UK= Universal Kriging
EBK= Empirical Bayesian Kriging



شکل۸- نقشه‌های درون‌یابی پارامترهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Fig 8. Interpolation Maps of Soil Parameters within the Study Region



شکل۹- نقشه‌های خطای پارامترهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Fig 9. Error Maps of Soil Parameters in the Study Area

۴- جنبه‌های کاربردی پژوهش

با توجه به این که برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که روش‌های درون‌یابی در تمامی شرایط و برای همه پارامترهای خاک بهترین عملکرد را ندارند، ارزیابی دقیق این روش‌ها و بررسی الگوی مکانی خطاهای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. باتوجه به این موضوع در پژوهش حاضر، علاوه بر ارزیابی کمی دقت روش‌های درون‌یابی، الگوی مکانی توزیع خطا نیز مورد بررسی قرار گرفت تا امکان انتخاب روش مناسبتر و تهیه نقشه‌های با اطمینان بالاتر فراهم شود. نقشه‌های خطا از جنبه کاربردی، امکان شناسایی مکانی نواحی با خطای پایین و در نتیجه قابلیت اعتماد بالاتر نتایج برآورد شده را فراهم می‌کنند. همچنین، شناسایی نواحی دارای خطای بالا می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی نمونه‌برداری‌های تکمیلی و افزایش تعداد نمونه‌ها در مناطق کم‌اطمینان مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، استفاده همزمان از نقشه‌های پارامترهای خاک و نقشه‌های خطای متناظر، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی قابلیت اعتماد نقشه‌ها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم کند. این رویکرد با شناسایی مناطق دارای عدم‌قطعیت و خطای بیشتر، امکان هدفمند کردن نمونه‌برداری‌های میدانی، کاهش نمونه‌برداری‌های غیرضروری و بهبود فرآیند مدل‌سازی و تهیه نقشه‌های مکانی پارامترهای خاک را فراهم می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری کلی

سبخاهای که در مجاورت تالاب هورالعظیم تشکیل شده‌اند، سبب از بین رفتن زمین‌های حاصلخیز، حساس شدن منطقه نسبت به فرسایش و تبدیل آن به کانون توفان‌های گرد و غبار شده است. لذا جهت مدیریت بهتر این منابع و تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر، نیاز به نقشه‌هایی دقیق از خصوصیات این منطقه می‌باشد. روش‌های درون‌یابی ابزاری مفید برای مطالعه تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک است. در نتیجه بررسی مدل‌های درون‌یابی برای تهیه نقشه دقیقی که پیش‌بینی ویژگی‌های خاک را ارائه می‌دهد، به یک مسئله مهم تبدیل شده است. در این پژوهش ابتدا ۸ روش درون‌یابی که شامل روش‌های قطعی (وزن‌دهی فاصله معکوس، توابع پایه شعاعی، چندجمله‌ای سراسری و چندجمله‌ای محلی) و روش‌های زمین‌آماری (کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ عام، کریجینگ تجربی بیزی) برای تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سبخاهای منطقه مورد مطالعه، مورد مقایسه قرار گرفتند. دقت عملکرد پیش‌بینی نقشه‌های تولید شده با استفاده از اعتبارسنجی متقابل ارزیابی شد. در نهایت نقشه توزیع خطا برای هر پارامتر تهیه گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های درون‌یابی در هر یک از پارامترهای سبخاهای مورد مطالعه، دقت‌های متفاوتی داشته‌اند. در نتیجه برای بررسی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های مختلف نیاز است که ابتدا ارزیابی از روش‌های مختلف درون‌یابی انجام گیرد. همچنین، از بین ۸ روش درون‌یابی مورد بررسی تنها برخی از این مدل‌ها عملکرد مناسبی را نشان دادند و روش‌های دیگر در نمایش تغییرات مکانی پارامترهای خاک عملکرد ضعیفی داشتند. در پارامتر آهک و شن مدل چند جمله‌ای سراسری دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها داشته است که به دلیل وجود خطاهای سیستماتیک و همچنین وجود روند کلی در توزیع این پارامترها می‌باشد. مناسب‌ترین مدل برای پارامترهای رس، شوری و گچ، روش کریجینگ بیزی تجربی بوده است، که احتمالا بدلیل توانایی این مدل در مدل‌سازی ناهمگنی‌های محلی می‌باشد. نتایج حاصل از نقشه‌های توزیع خطا در پارامترهای مختلف رفتار یکسانی نداشته‌اند. نقشه پارامترهای شوری، گچ، رس و واکنش خاک (Ec، Gyps، Clay و PH) در منطقه مورد مطالعه رفتار یکنواخت و یک خطای ثابت را نشان می‌دهند که بیانگر برازش مناسب مدل می‌باشد. نقشه‌های توزیع خطا در سیلت، کربن آلی، نسبت جذب سدیمی، وزن مخصوص ظاهری و رطوبت (Silt، OC، SAR، ρb و Θm)، خطاهای اتفاقی زیاد را نشان می‌دهد، با توجه به این که بهترین مدل درون‌یابی برای هر پارامتر انتخاب شده بود ولی خروجی مدل نتایج ضعیفی داشته است. خروجی خطا در پارامترهای آهک و شن (Sand و $CaCo_3$) وجود خطاهای شبه سیستماتیک را نشان می‌دهد. در نتیجه افزایش دقت مدل‌های درون‌یابی و بهینه‌سازی خطای حاصل از این روش‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از نظر کاربردی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده همزمان از نقشه‌های خاک و نقشه‌های توزیع خطای آن می‌تواند قابلیت اعتماد

به نتایج را افزایش دهد، همچنین در شناسایی نواحی دارای خطای بالا و پایین موثر می‌باشد. این نقشه‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری مکمل جهت تفسیر نقشه‌های خاک برای تصمیم‌گیری مدیریتی مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به محدودیت‌های مشاهده شده در عملکرد برخی از روش‌های درون‌یابی، پیشنهاد می‌شود برای کمینه کردن مقدار خطای ناشی از روش‌های درون‌یابی و بهبود نواقص آن از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI) و دما (LST) به عنوان داده‌های کمکی استفاده شود. همچنین از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی، رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی که توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده و شناسایی الگوهای موجود در داده‌ها جهت بهینه‌سازی عملکرد را دارا می‌باشند، استفاده گردد.

مراجع

Abyat, A., Azhdari, A., Jodaki, M., Darvish-Khatuni, J., 2017. Investigation and differentiation of Quaternary sedimentary environments in the Khuzestan Plain. Advanced Applied Geology 25. 49-64. 10.22055/aag.2017.21931.1702 (In Persian).

Abyat, A., Azhdari, A., Almasi Kia, H., Jodaki, M., 2019. Khuzestan plain continental sabkhas, south west Iran. Carbonates and Evaporites 34. 1469-1487. https://doi.org/10.1007/s13146-019-00494-3.

Abyat, K., Landi, A., Amerikhah, H., 2021. Evaluation of sabkha changes caused by Hur al-Azim wetland during 20 years using Landsat images. Water and Soil Conservation 1. 165-181. DOI: 10.22069/jwsc.2021.18238.338 (In Persian).

Akbari, Gh. H., Barati, R., Lotfi, I., Seifi, M., 2024. Evaluation of interpolation methods in estimating the groundwater level (Case Study: Razavi Khorasan Plains). Integrated Watershed Management 4. 52-67. doi= 10.22034/iwm.2024.2023149.1138

Asghari Saraskanroud, P., Zeinali, B., Qale, A., 2021. Evaluation of groundwater quality changes using geostatistical methods (case study: Isfahan Barkhorastan plain). Scientific Journal of Wetland Ecobiology 2. 51-68. http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-957-fa.html

Behnam, V., Karami, A., Safarzadeh Shirazi, S., 2024. Investigation of spatial variation of some soil properties using geostatistical methods (Case study: Margon city, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province, Iran). Environ. Water Eng 10, 558-571. https://doi.org/10.22034/ewe.2024.418442.1893 (In Persian)

Blake, R. G. and Hartge, K. H., 1986. Bulk density. In: Methods of soil, analysis. Part1.physical and Mineralogical Methods, KluteA. (ed). Agronomy series, ASA-SSSA, Madison, Wisconsin. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13

Bronowicka-Mielniczuk a, Mielniczuk, J., 2023. New indices to quantify patterns of relative errors produced by spatial interpolation models – A comparative study by modelling soil properties Urszula. Ecological Indicator 154. 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110551

Dargahian, F., lotfinasabasl, S., Khosroshahi, M., 2020. study of drought catchment hendijan- Jarahee using geostatistics. Journal of Space Geography 37. 13-28. https://doi.org/10.30488/gps.2021.142367.2848 (In Persian).

Esfandiari-Darabad, F., Aali-Jahan, M., Rahimi, M., 2014. Evaluation of algebraic and geostatistical models in estimating the spatial distribution of water table in the Ardabil plain. Quantitative Geomorphology Research 2 .44-62. 20.1001.1.22519424.1393.3.2.4.2 (In Persian).

Farnia, E., Ghorbani, Kh., Salarijezi, M., 2018. Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging Method in Groundwater Level Zoning. Journal of Soil and Water Conservation 1. 165-182. DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

Fotouhi Firouzabad, F., Maleknejad, H., 2020. Analysis and Zonation of Maximum 24-Hour Rainfall of Iran Using Wakeby Distribution and Geostatistic Technique. Desert Management Journal 14. 75-92. https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38477

Jiang, B., Xu, Wenyue, Zhang, D., Nie, F., Sun, Q., 2022. Contrasting multiple deterministic interpolation responses to different spatial scale in prediction soil organic carbon: A case study in Mollisols regions. Ecological Indicators 134. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108472

John, K., Afu, SM., Isong, IA., Aki, EE., Kebonye, NM., Ayito, Eo., Chapman, PA., Eyong, MO., 2021. Mapping soil properties with soil-environmental covariates using geostatistics and multivariate statistics. International Journal of Environmental Science and Technology 18.16 p. https://doi.org/10.1007/s13762-020-03089-x

Kabolizadeh, M., Zareie, S., Abbsi, M., 2023. Analysis of Groundwater Quality Spatial Distribution Pattern and Spatial Variations in Electrical Conductivity (Case Study: Hamadan Province). Advanced Applied Geology 4 .747-767.https://doi.org/10.22055/aag.2022.39635.2271 (In Persian).

Khosravi, Y., Abbasi, I., 2016. Spatial Analysis of Environmental Data with Geostatistics, Azar Kalak. Zanjan p. 280

Lanyon, L.E., Heald, W.R., 1982. Maagriesium, Calcium, Strontium and barium. In: A.L., Page et al.(eds), Methods of soil Analysis. Part II, Argon. Monogar., ASA and SSSA, Madison, Wl 247-260. https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c14

Lotfi Nasab Asl, S., Gohar Dost, A., Khosroshahi, M., 2018. Assessment and Application of Geostatistics in Identifying and Analyzing Drought Characteristics of Jazmourian Watershed. Journal of Watershed Management Researc 18. 12-25. (In Persian). http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.9.18.12

Mir-Abdallahi Hasanati, A., Amiri, A., 2022. Investigating Spatio-Temporal Variations of Groundwater Quality ofGuilan Province using Geostatistical Method. Environment and Water Engineering 1. 269-677. DOI: 10.22034/JEWE.2021.270090.1505 (In Persian).

Nelson, R.E., 1982. Carbonate and gypsum. In Methods of soil, naiysis, part2. Chemical and microbiological propertis, Agronomy serise9(2 nd edition), A.L. Page, R. H. Miller and Keeney, D. R. eds. American Society of Agronomy 97-181. ISBN: 978-0-891-18977-0

Osat, M., Hedari, A., Salami, A., 2021. Using soil properties map in the production of detailed soil maps. Water and Soil Conservation 28. 109-127. DOI: 10.22069/jwsc.2021.18161.3376

Page, A. L., Miller, R.H., Keeney, D. R., 1982. Methods of soil, naiysis, part2. Chemical and microbiological propertis, Second, Soil Science Society of America ASA-SSA, Madison. ISBN: 978-0-89118-072-2

Rhoades, J.D., 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. 417-435. https://doi.org/10.1002/saj2.20154

Salarifar, M., 2022. Comparison of the performance of algebraic and geostatistical methods in determining spatial variations in groundwater quality in the Tabriz Plain, Hydrogeology 2. 160-171. 10.22034/hydro.2022.51375.1263 (In Persian).

Selmy, S., Abd El-Aziz, A., El-Desoky, M., El-Sayed., 2022.Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 21. 383-396, https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013

Timourzadeh, S., Mizraei Mohammadabadi, R., Mohammadi, M., 2019. Application of Empirical Bayesian Kriging in Zoning Soils to Heavy Metals (Case Study: Esfarayen County). Journal of Environmental Sciences and Technology 21, 89-105. https://civilica.com/doc/1288634

UNEP., 2001. The Mespotamian Marshlands: demise of an ecosystem. Early Warning and Assessment Technical Reportm, UNEP, DEWA 1-46. ISBN: 92-807-2069-4

Walakly, A., and Black, I.A., 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organice matter and proposed modification of chromic acid titration method. Soil SCIENCE 37, 29-38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003

Warren, J.K., 2006. Evaporites: Sediments, resources and hydrocarbons: New York. Springer.1-1052.

Zhang, Zh., Zhou, Y., Huang, X., 2020. Applicability of GIS-based spatial interpolation and simulation for estimating the soil organic carbon storage in karst regions. Global Ecology and Conservation 21. 1-12. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00849