

(OPEN ACCESS)

Evaluating the effectiveness of environmental variables in modeling spatial distribution of cation exchange capacity in Sistan Plain using geostatistical approaches

Khalilollah Mirakzehi¹, Saeid Hojati^{*2}, Ali Shahriari³,
Mohammad Reza Pahlavan-Rad⁴

1. Ph.D. Student of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran. E-mail: mirakzahi93@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran. E-mail: s.hojati@scu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Sistan and Balouchestan, Iran. E-mail: shahriari.ali@uoz.ac.ir
4. Associate Prof., Soil and Water Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Golestan, Iran. E-mail: pahlavanrad@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 06.07.2025

Revised: 09.30.2025

Accepted: 11.14.2025

Keywords:

Arid region,
Cokriging,
Digital Soil Mapping,
Flood Plain

ABSTRACT

Background and Objectives: Soil maps are essential tools for various users and decision-makers in the field of soil science. Accurate knowledge of the spatial distribution of physical and chemical soil properties, such as cation exchange capacity, is crucial for effective agricultural management. Soil cation exchange capacity is a key factor in fertility management and crop production, making the modeling of its spatial distribution important for farmers and agricultural managers. Previous studies have demonstrated that geostatistical methods can effectively predict and map soil properties. Given that measuring soil cation exchange capacity is both time-consuming and costly, this study aims to produce a spatial distribution map of soil cation exchange capacity, identify the environmental factors influencing its spatial variation, and compare different interpolation methods for predicting cation exchange capacity values in the Sistan Plain.

Materials and Methods: For this study, 422 points were randomly selected using a supervised method in the Sistan plain, and surface soil samples (0-20 cm depth) were collected at the designated points during the summer of 2024. Additionally, remote sensing data, including OLI sensor images from Landsat 8 (comprising single bands and indices derived from band ratios), were obtained for the date closest to the soil sampling. The remote sensing indices were calculated and extracted using ArcGIS software version 10.8.2. Environmental variables derived from the digital elevation model (DEM) of the study area, with a spatial resolution of 30 meters, were downloaded from the ASTER database and processed using SAGAGIS software version 7.5. In ArcGIS, the corresponding values of indices from satellite images and DEM at the sampling points were extracted and saved as tables in Excel. In total, 81 environmental variables across three categories-soil variables, remote sensing variables, and those derived from the digital elevation model-were evaluated. In the next step,

variables that showed significant correlations with soil cation exchange capacity were included in the modeling process and geostatistical analyses. Inverse distance weighting methods (with power parameters of 1, 2, and 3), as well as simple and ordinary kriging and cokriging, were employed to interpolate and predict cation exchange capacity at unsampled locations. The impact of all selected environmental variables, both individually and in combination, on the prediction accuracy of cation exchange capacity was examined using simple and ordinary cokriging methods. Furthermore, to assess the accuracy of the different models, two statistics-the root mean square error (RMSE) and mean error (ME)-were calculated.

Results: The results indicated that the mean cation exchange capacity in the Sistan Plain was 12.67 centimoles per kilogram of soil. The Gaussian model was identified as the best variogram model for predicting the spatial variability of cation exchange capacity in Sistan soils, based on the lowest residual sum of squares (RSS) and the highest coefficient of determination (R^2) ($R^2 = 0.60$, $RSS = 289$). The spatial correlation of cation exchange capacity across the study area was moderate, likely due to the region's geomorphological complexity and variations in depositional environments. Correlation analysis between cation exchange capacity and the auxiliary variables used in this study revealed that variables derived from the digital elevation model exhibited the strongest correlations with soil CEC. Among the soil variables, the clay percentage; among the remote sensing variables, the near-infrared band; and among the DEM-derived variables, elevation above sea level, were identified as the most effective predictors of cation exchange capacity. Among the interpolation methods evaluated, ordinary cokriging performed best ($ME = -0.011$, $RMSE = 7.116$) compared to kriging and inverse-distance weighting. It was selected as the model for mapping the spatial distribution of cation exchange capacity in the study area. Of all the scenarios and interpolation approaches assessed, ordinary cokriging, which combines percent clay, near-infrared band, and elevation above sea level, was identified as the most accurate method for mapping soil cation exchange capacity in the Sistan plain. The spatial distribution pattern of soil cation exchange capacity in the area indicates that the lowest values (less than 6 cmolc per kg of soil) occur in the southeastern and some southern regions. In the eastern, southern, and northwestern areas, the values range from low to moderate (6–12 cmolc per kg). Meanwhile, the central, northeastern, and western parts of the area exhibit moderate to high values (12–24 cmolc per kg). The highest cation exchange capacities (greater than 24 meq per 100 g of soil) were observed in small areas in the northeast and west.

Conclusion: In conclusion, the spatial distribution pattern of soil cation exchange capacity in the region is significantly influenced by soil particle size, geomorphology, and hydrological conditions. This study demonstrates that by integrating selected environmental variables-those that reflect or affect the soil-forming conditions in the region-along with the geostatistical cokriging method, accurate maps of soil cation exchange capacity can be produced.

Cite this article: Mirakzehi, Khalilollah, Hojati, Saeid, Shahriari, Ali, Pahlavan-Rad, Mohammad Reza. 2026. Evaluating the effectiveness of environmental variables in modeling spatial distribution of cation exchange capacity in Sistan Plain using geostatistical approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (1), 99-125.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23843.3821

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی کارایی متغیرهای محیطی بر مدل‌سازی توزیع مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان با استفاده از روش‌های زمین‌آماري

خلیل‌اله میرک زهی^۱، سعید حجتی^{۲*}، علی شهریاری^۳، محمدرضا پهلوان‌راد^۴

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران. رایانامه: mirakzahi93@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران. رایانامه: s.hojati@scu.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، سیستان و بلوچستان، ایران. رایانامه: shahriari.ali@uoz.ac.ir
۴. دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، گلستان، ایران. رایانامه: pahlavanrad@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: نقشه‌های خاک یکی از نیازهای اصلی برای کاربران و تصمیم‌سازان علوم زمین است. آگاهی دقیق از توزیع مکانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مانند ظرفیت تبادل کاتیونی برای تصمیم‌گیری مناسب در مدیریت مؤثر کشاورزی می‌تواند مهم باشد. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک یکی از ویژگی‌های کلیدی برای مدیریت حاصلخیزی و تولید گیاهی است و مدل‌سازی مکانی آن برای کشاورزان و مدیران این حوزه دارای اهمیت است. مطالعات پیشین ثابت نموده است که می‌توان از روش‌های زمین‌آماري به‌طور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک استفاده نمود. از این‌رو با عنایت به این‌که اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های دیربافت و هزینه‌بر از چالش‌های پیش روی پژوهش‌گران محسوب می‌شود و هم‌چنین در رابطه با بررسی روند تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در دشت سیستان مطالعه‌ای انجام نشده است، بنابراین این مطالعه با هدف تهیه نقشه پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تعیین عوامل (متغیرهای) محیطی تأثیرگذار بر تغییرات مکانی این ویژگی و هم‌چنین مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی در پیش‌بینی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی در اراضی دشت سیستان انجام شد.
تاریخ دریافت: ۰۴/۰۳/۱۷	
تاریخ ویرایش: ۰۴/۰۷/۰۸	
تاریخ پذیرش: ۰۴/۰۸/۲۳	
واژه‌های کلیدی: دشت سیلابی، کوکریجینگ، منطقه فراحشک، نقشه‌برداری رقومی خاک	
مواد و روش‌ها: به‌منظور انجام این پژوهش تعداد ۴۲۲ نقطه به روش نظارت‌شده تصادفی در دشت سیستان انتخاب و سپس در تابستان سال ۱۴۰۳ از خاک سطحی (عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری) در نقاط پیشنهادی نمونه‌برداری شد. هم‌چنین، در این مطالعه از داده‌های سنجش‌ازدوری شامل تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ (باندهای منفرد و شاخص‌های	

حاصل از نسبت‌گیری بانندی) مربوط به نزدیک‌ترین زمان نمونه‌برداری از خاک استفاده شد. شاخص‌های سنجش‌ازدوری موردنظر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نسخه شماره 10.8.2 محاسبه و استخراج شدند. همچنین متغیرهای محیطی مشتق شده از مدل رقومی ارتفاعی محدوده مطالعاتی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از پایگاه استر بارگیری و سپس با کمک نرم‌افزار SAGGIS نسخه شماره 7.5 استخراج شدند. سپس در نرم‌افزار ArcGIS مقادیر متناظر شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های رقومی ارتفاعی در نقاط نمونه‌برداری شده استخراج و به‌صورت جدول در نرم‌افزار Excel ذخیره گردید. در مجموع ۸۱ متغیر محیطی در سه دسته متغیرهای خاکی، سنجش‌ازدوری و مستخرج شده از مدل رقومی ارتفاع موردسنجش قرار گرفتند. در گام بعد، متغیرهایی که همبستگی معنی‌داری با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نشان دادند، وارد فرآیند مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماري شدند. روش وزن‌دهی معکوس فاصله (در سه حالت توان اول، دوم و سوم)، کریجینگ ساده و معمولی و کوکریجینگ ساده و معمولی به‌عنوان روش‌های زمین‌آماري برای میان‌یابی و پیش‌بینی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی در نقاط نمونه‌برداری نشده مورد استفاده قرار گرفتند. تأثیر تمامی متغیرهای محیطی منتخب به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر دقت پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی توسط روش‌های کوکریجینگ ساده و معمولی بررسی گردید. به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های مختلف از دو آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی در دشت سیستان ۱۲/۶۷ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک می‌باشد. بهترین مدل تغییرنا براساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر مقدار ضریب تبیین (R^2) برای پیش‌بینی تغییرپذیری مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک‌های دشت سیستان، مدل گوسی ($R^2 = ۰/۶۰$ و $RSS = ۲۸۹$) به‌دست آمد. بررسی همبستگی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه مطالعاتی، در کلاس متوسط به‌دست آمد که احتمالاً به دلیل پیچیدگی‌های ژئومورفولوژیکی منطقه و تغییرات در محیط‌های رسوبگذاری است. بررسی همبستگی بین ظرفیت تبادل کاتیونی و متغیرهای کمکی استفاده‌شده در این پژوهش بیانگر آن است که متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع بیش‌ترین همبستگی را با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند. در بین متغیرهای خاکی، درصد رس، در بین متغیرهای سنجش‌ازدوری، باند مادون‌قرمز نزدیک و در بین متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع، ارتفاع منطقه از سطح دریا به‌عنوان مؤثرترین متغیرهای پیش‌بینی کننده ظرفیت تبادل کاتیونی تشخیص داده شدند. از بین روش‌های میان‌یابی استفاده‌شده، روش کوکریجینگ معمولی بهترین عملکرد ($ME = -۰/۰۱۱$ و $RMSE = ۷/۱۱۶$) را در مقایسه با روش‌های کریجینگ ساده و وزن‌دهی عکس فاصله نشان داد و به‌عنوان مدل منتخب برای تهیه نقشه پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی منطقه مورد استفاده قرار گرفت. از بین سناریوها و روش‌های مختلف میان‌یابی به‌کارگرفته شده در این پژوهش، روش کوکریجینگ معمولی با تلفیق هر سه متغیر فراوانی رس، باند مادون‌قرمز نزدیک و ارتفاع منطقه از سطح دریا به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش تهیه نقشه ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان انتخاب شد. بررسی الگوی پراکنش مکانی

ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه نیز بیانگر آن است که مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در قسمت‌های جنوب شرقی و بخش‌هایی از جنوب منطقه کم‌ترین مقدار (کم‌تر از ۶ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) بوده و در قسمت‌های شرقی، بخش‌هایی از جنوب و شمال غرب منطقه دارای مقدار کم تا متوسط (۶-۱۲ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) است. در بخش‌های مرکزی، شمال شرق و غرب منطقه مقادیر متوسط تا زیاد (۱۲-۲۴ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) و در بخش‌های کوچکی از شمال شرق و غرب منطقه بیش‌ترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (بیش‌تر از ۲۴ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم خاک) مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: در کل می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که الگوی پراکنش مکانی تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در منطقه به‌شدت تحت‌تأثیر الگوی پراکنش اندازه ذرات خاک، ژئومورفولوژی منطقه و شرایط هیدرولوژیکی است. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که تلفیق متغیرهای محیطی منتخب در این پژوهش که منعکس‌کننده شرایط خاک‌سازی و یا عوامل مؤثر بر آن هستند، همراه با استفاده از روش زمین‌آماري کوکریجینگ می‌تواند به تهیه نقشه‌های ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با دقت خوب منجر شود.

استناد: میرک زهی، خلیل‌اله، حجتی، سعید، شهریاری، علی، پهلوان‌راد، محمدرضا (۱۴۰۵). بررسی کارایی متغیرهای محیطی بر مدل‌سازی توزیع مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان با استفاده از روش‌های زمین‌آماري. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۱)، ۹۹-۱۲۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23843.3821



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

کیفیت خاک متأثر از فرآیندهای ژئوشیمیایی، بیولوژیکی و هیدرولوژیکی است (۱). کیفیت خاک شامل دو بخش است یک بخش اصلی که در برگیرنده استعداد ذاتی خاک در عمل به وظیفه خود در حمایت از رشد و نمو گیاه است و یک بخش دینامیک که متأثر از نوع کاربری و مدیریتی است که بر خاک اعمال می‌شود. بخش دوم بر این نکته تأکید دارد که خاک‌های با کیفیت خوب در اثر مدیریت ضعیف دچار تخریب و افت کیفیت خواهند شد. کیفیت خاک نه تنها ظرفیت خاک برای تأمین مواد مغذی مورد نیاز گیاهان را نشان می‌دهد، بلکه باید از عملکرد خاک در پاسخ به تغییر کاربری و مدیریت زمین نیز پشتیبانی نماید (۲). پیش‌بینی کیفیت خاک و ارزیابی عملکرد آن می‌تواند اطلاعات جغرافیایی دقیقی در مورد مدیریت خاک ارائه دهد، که به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت به‌سزایی دارد (۳).

در نظر گرفتن اطلاعات خاک برای حفظ و تعیین شیوه‌های مدیریت پایدار اراضی مهم است (۴). ویژگی‌های خاک درجه پیچیده‌ای از تغییرات مکانی و زمانی را به نمایش می‌گذارند و نتیجه تعامل فرآیندهای زیستی، فیزیکی و شیمیایی در مقیاس‌های مختلف است (۵). به‌منظور مدیریت خاک‌های زراعی و حفظ حاصلخیزی خاک، بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از اهمیت زیادی برخوردار است. آگاهی دقیق از توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک برای مدیریت مؤثر کشاورزی و تصمیم‌گیری مناسب می‌تواند بسیار مهم باشد (۶). ویژگی‌های خاک عمدتاً تحت تأثیر عواملی مثل آب و هوا، موجودات زنده، توپوگرافی، مواد مادری و زمان تغییر می‌کنند (۷).

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک^۱ از جمله ویژگی‌های مهم خاک است که معیار خوبی از تغذیه گیاه، جذب

سطحی آلاینده‌ها و آبشویی املاح از خاک محسوب می‌گردد (۸). به‌طور کلی ظرفیت تبادل کاتیونی عبارت است از مقدار کل کاتیون‌هایی که خاک می‌تواند در واحد جرم خود به‌صورت قابل‌قبول نگه دارد (میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک یا سانتی مول بار در کیلوگرم خاک). در واقع ظرفیت تبادل کاتیونی از ویژگی‌های مهم خاک است که کاربردهای مختلفی مانند مسائل کشاورزی و عمرانی دارد. در مباحث کشاورزی، ظرفیت تبادل کاتیونی بیانگر توانایی خاک برای حفظ مواد مغذی ضروری برای رشد گیاه و همچنین ایجاد خاصیت بافیری در خاک است. در استفاده مهندسی از خاک نیز، ظرفیت تبادل کاتیونی برای برآورد اولیه طراحی ساخت‌وساز و ارزیابی تورم خاک و رس‌ها استفاده می‌شود (۹). به‌علاوه، مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی یکی از ورودی‌های اصلی اکثر مدل‌سازی‌های خاک و محیط زیستی می‌باشد (۱۰). رس‌ها و مواد آلی خاک به دلیل دارا بودن سطح ویژه و بارالکتریکی زیاد نقش مهمی در تعیین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند و با زیاد شدن مقادیر آن‌ها در خاک مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش می‌یابد (۱۱). با این وجود، در برخی پژوهش‌ها همبستگی معنی‌داری بین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و برخی ویژگی‌های دیگر خاک مانند شن، سیلت و هدایت الکتریکی گزارش شده است (۱۲).

یکی از روش‌های تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM^۲) است. نقشه‌برداری رقومی خاک یک روش ریاضی برای ایجاد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده خصوصیات پیوسته و طبقه‌بندی خاک با استفاده از ویژگی‌های محیطی است. این روش مدل‌سازی را می‌توان برای ارتباط متغیرهای کمکی محیطی و متغیرهای خاکی هدف با استفاده از چارچوب DSM پیاده‌سازی کرد (۱۳). استفاده از روش‌های DSM به‌عنوان ابزاری برای

1- Cation Exchange Capacity

2 - Digital soil mapping

به‌کارگیری روش‌های مختلف زمین‌آماري اقدام به مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (۲۴ و ۲۵) و مدیریتی خاک (۲۵) نموده‌اند. در این رابطه، برخی مطالعات نیز بر مدل‌سازی تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري پرداخته‌اند (۲۶ و ۲۷) که نتایج تمامی پژوهش‌های مورد اشاره نشان از کارایی روش‌های زمین‌آمار در مورد مدل‌سازی مکانی ویژگی‌های خاک و به‌ویژه ظرفیت تبادل کاتیونی داشته‌اند.

دشت سیستان در شرق ایران در دلتای رودخانه هیرمند واقع شده است و دارای اقلیمی به‌شدت خشک با وزش بادهای موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه است (۲۸). این دشت حدود ۲۵۰ هزار هکتار اراضی قابل‌کشت دارد و محصولات اصلی آن غلات، جالیز، سبزی و صیفی‌جات و تاکستان‌ها هستند و از این‌رو، این دشت در امنیت غذایی و اقتصاد منطقه نقش کلیدی ایفا می‌کند. بررسی منابع انجام شده بیانگر آن است که علی‌رغم اهمیت ظرفیت تبادل کاتیونی در برنامه‌ریزی مدیریت اراضی تاکنون در رابطه با اندازه‌گیری و بررسی تغییرپذیری مکانی این ویژگی در منطقه، مطالعه‌ای انجام نشده است. از این‌رو، این پژوهش با هدف تهیه نقشه پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و تعیین عوامل (متغیرهای) محیطی تأثیرگذار بر تغییرات مکانی این ویژگی و هم‌چنین مقایسه روش‌های مختلف میان‌یابی در پیش‌بینی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اراضی دشت سیستان انجام شده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند اطلاعات ذی‌قیمتی را در برنامه‌ریزی مدیریت اراضی با توجه به مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی در اختیار کشاورزان، مدیران و برنامه‌ریزان اراضی قرار دهد.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقه مطالعاتی: منطقه مورد مطالعه بخش عمده‌ای از اراضی دشت سیستان (اراضی کشاورزی)

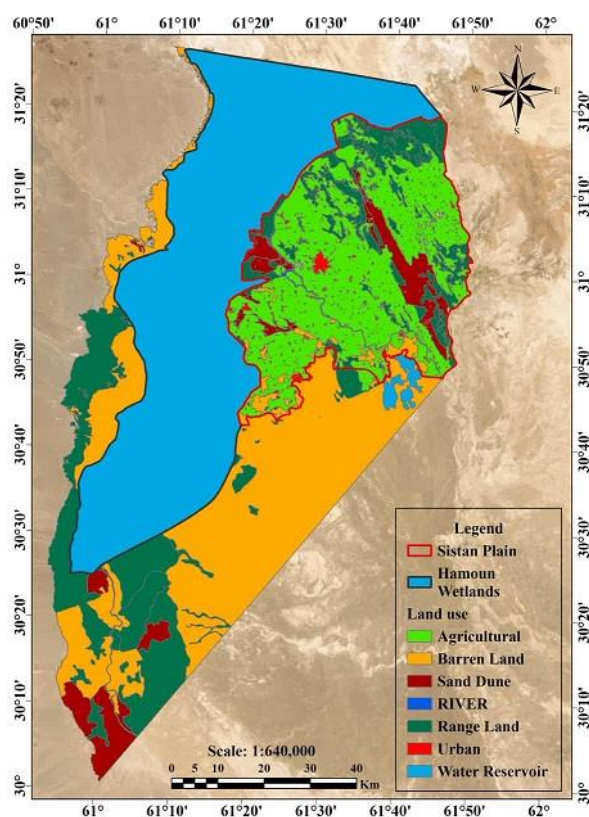
توسعه نقشه‌های خاک با استفاده از پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های محاسباتی، سنجش‌ازدور و هم‌چنین کاهش زمان و هزینه‌ها تغییر یافته است (۱۴).

از جمله روش‌های رایج در DSM، روش‌های زمین‌آماري هستند که در چند دهه گذشته تکامل و گسترش زیادی داشته‌اند و از سوی پژوهش‌گران برای توصیف تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک استفاده شده‌اند. در این خصوص، مطالعات متعددی در کشورهای مختلف برای درون‌یابی توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شده است (۱۵، ۱۶ و ۱۷). روش‌های زمین‌آماري ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییرپذیری و کمی کردن غیریکنواختی محیط فراهم می‌کند (۱۸) و شامل روش‌های مختلف برای تخمین‌پذیری مکانی یک متغیر است (۱۹). هم‌چنین روش‌های زمین‌آماري به‌عنوان ابزارهای مناسب و قوی در برآورد متغیرهای منطقه‌ای و ارزیابی تغییرات مکانی در مطالعات خاک استفاده می‌شوند (۱۵، ۲۰). به‌طورکلی، هر تخمین زمین‌آماري شامل دو مرحله است که مرحله اول شامل شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیرهایی است که براساس آنالیز واریوگرام مورد بررسی قرار می‌گیرند. مرحله دوم نیز شامل تخمین متغیر موردنظر با استفاده از توابع زمین‌آماري از جمله کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله است (۲۱).

امروزه پیشرفت و استفاده از فناوری‌های جدید مانند دریافت و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و سیستم‌های پردازش اطلاعات مانند زمین‌آمار، نقش مهمی در پایش و ارزیابی مدیریت منابع خاک و آب دارد و این فناوری‌ها علاوه بر این که می‌توانند موجب کاهش هزینه‌ها شوند، باعث افزایش سرعت و دقت در انجام پروژه‌ها نیز می‌گردند (۲۲، ۲۳). از این تکنیک‌ها می‌توان برای تولید متغیرهای محیطی مختلف برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک استفاده نمود. از این‌رو در مناطق مختلف دنیا پژوهش‌گران با

۵۲۱ متر از سطح دریای آزاد است که در قسمت‌های مختلف دشت متغیر است. شیب منطقه بین ۱-۲ درصد است و خاک‌ها از لحاظ میزان تکامل جوان (انتی سولز) تا با تکامل کم تا متوسط (اردی سولز) هستند و از لحاظ رژیم رطوبتی و حرارتی به ترتیب در رژیم‌های اریدیک و هایپرترمیک قرار دارند (۲۸). از لحاظ شرایط آب و هوایی نیز دشت سیستان دارای اقلیم گرم، خشک و بیابانی است. میانگین دمای فصل تابستان و زمستان به ترتیب بیش از ۴۰ درجه و ۵ درجه سانتی‌گراد بالای صفر است و بارش سالانه آن حدوداً ۶۰/۸ میلی‌متر می‌باشد (۳۰) بررسی نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی (شکل ۱) نیز نشان می‌دهد که اراضی زراعی با مساحت ۱۴۵۹۲۴ هکتار سهم قابل‌توجهی از محدوده مطالعاتی را به خود اختصاص می‌دهد و تپه‌های شنی با مساحت ۶۰۹۷۹ هکتار نیز در بخش‌های از محدوده مطالعاتی پراکنده می‌باشند.

با مساحتی حدوداً ۲۳۵۰۰۰ هکتار است. دشت سیستان در شرق کشور و در شمال استان سیستان و بلوچستان، بر روی دلتای رودخانه هیرمند واقع شده است. این دشت دلتایی حاصل رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای است که به‌عنوان یک جلگه پهناور شناخته می‌شود و از رودخانه هیرمند در کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرد این منطقه از جنوب با شهرستان زاهدان و از غرب با خراسان جنوبی و از شرق و شمال با کشور افغانستان مرز مشترک دارد (۲۹). دشت سیستان یک دشت سیلابی و فاقد هر گونه فعالیت کوه‌زایی و طبقات ارتفاعی است و پستی و بلندی کمی دارد. مشخصه بارز دشت سیستان، مسطح بودن فیزیوگرافی، فرسایش بادی شدید، ناچیز بودن کربن آلی خاک، ساختمان نامناسب و وجود ریزگردهای زیاد و خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت است. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب ۴۳۱ و



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی دشت سیستان.

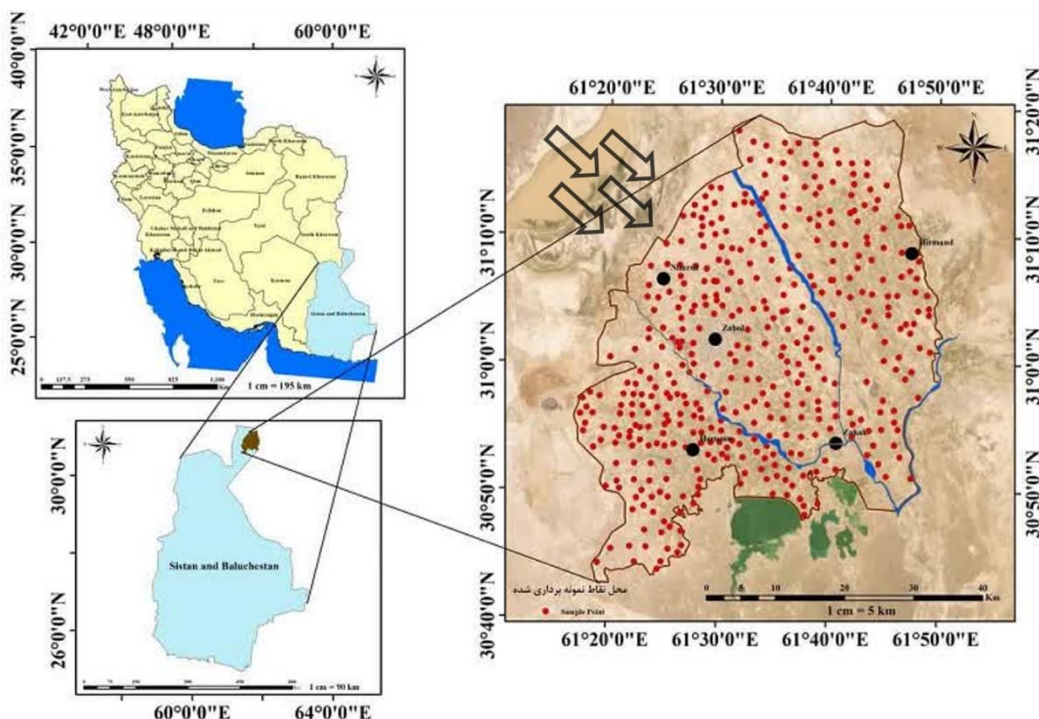
Figure 1. Land use map of Sistan Plain.

سدیم (۳۴)، فعالیت دو عنصر کلسیم و منیزیم محلول (meq.L^{-1}) به روش تیتراسیون با ورسین (۳۵) و رطوبت اشباع به روش وزنی (۳۶)، محتوای کربن آلی (درصد) به روش اکسیداسیون تر در مجاورت دی کرومات پتاسیم (۳۷)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۳۸) اندازه‌گیری شدند. نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبدلی به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند (۳۹).

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

$$ESP = \frac{Na_x}{CEC} \times 100 \quad (2)$$

نمونه‌برداری خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی: موقعیت ۴۲۲ محل نمونه‌برداری به روش نظارت شده تصادفی تعیین (شکل ۲) و سپس در تابستان سال ۱۴۰۳ از خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متری) به صورت مرکب نمونه‌برداری شد (شکل ۳). پس از جمع‌آوری، شماره‌گذاری و ثبت موقعیت مکانی، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردیدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های برداشت شده شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (۳۱)، pH در عصاره گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی در عصاره اشباع با کمک دستگاه EC متر (۳۲)، محتوای سدیم محلول (meq.L^{-1}) در عصاره اشباع و با دستگاه فیلم فتومتر (۳۳)، CEC ($\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$) به روش استات



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری شده در سیستان و بلوچستان.

فلش‌های سیاه رنگ جهت باد غالب را نشان می‌دهند.

Figure 2. Location of the study area in Sistan and Baluchestan Province showing position of the sampling points. Black arrows show the dominant wind direction.



شکل ۳- تصاویری از برخی محل‌های نمونه‌برداری شده در دشت سیستان.

Figure 3. Images of some sampling sites in Sistan Pain.

نمونه‌برداری) داده‌های سنجش‌ازدور شامل تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ (باندهای منفرد و شاخص‌های حاصل از نسبت‌گیری باندهای) برای تهیه شاخص‌های موردنظر در این پژوهش استفاده شد (جدول ۱). شاخص‌های سنجش‌ازدوری هدف با نرم‌افزار ArcGIS نسخه شماره 10.8.2 محاسبه و استخراج شدند. همچنین متغیرهای محیطی مشتق

مدلسازی مکانی به روش زمین‌آماري

متغیرهای محیطی و نحوه استخراج آن‌ها: تصاویر سنجش‌ازدور می‌توانند برای به‌دست آوردن اطلاعات کمی و کیفی در مورد ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گیرند و یک منبع داده ضروری و بسیار مقرون به صرفه برای پروژه‌های نقشه‌برداری هستند (۴۰). در این مطالعه از سری زمانی (تصاویر مربوط به زمان

متغیرهای محیطی به صورت متغیرهای کمکی و به صورت جداگانه در روش‌های کوکریجینگ معمولی و ساده مورد بررسی قرار گرفتند.

انتخاب بهترین مدل: از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) به منظور مقایسه مدل‌های مختلف زمین‌آماري و انتخاب بهترین مدل برای برآورد متغیر وابسته (ظرفیت تبادل کاتیونی) استفاده شد.

برای محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از رابطه ۳ استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_j)^2} \quad (3)$$

که در رابطه ۳، n تعداد کل داده‌ها، Y_i مقدار اندازه‌گیری شده و \hat{Y}_j مقدار پیش‌بینی شده است. برای محاسبه میانگین خطا (ME) از رابطه ۴ استفاده شد:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y^*(xi) - Y(xi)] \quad (4)$$

که در رابطه ۴، $Y(xi)$ مقدار محاسبه شده در نقطه xi و $Y^*(xi)$ مقدار پیش‌بینی شده در نقطه xi است (۴۱).

شده از مدل رقومی ارتفاعی^۱ منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از تارنمای پایگاه داده‌های مکانی استر (Aster Web: jpl.nasa.gov/gedem.sb) بارگیری و پس از انجام پیش پردازش‌های لازم استفاده شدند. متغیرهای محیطی مشتق شده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با کمک نرم‌افزار SAGAGIS نسخه شماره 7.5 استخراج شدند (جدول ۲) و پس از آن در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ابزار Extract Multi Values of Points در هر نقطه نمونه‌برداری شده مقادیر متناظر مربوط به شاخص‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های رقومی ارتفاع استخراج و با استفاده از ابزار Table Excel به صورت جدول در نرم‌افزار اکسل ذخیره شدند.

به منظور تعیین ماتریس همبستگی بین متغیرهای محیطی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از نرم‌افزار SPSS نسخه شماره ۲۶ استفاده شد و متغیرهایی که همبستگی معنی‌دار با ظرفیت تبادل کاتیونی را نشان دادند وارد فرآیند مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماري شدند و سایر متغیرها حذف گردیدند. آن‌گاه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های هر متغیر منتخب تهیه گردید. شایان ذکر است که روش‌های مختلف میان‌یابی شامل روش وزندهی معکوس فاصله، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ ساده و کوکریجینگ معمولی با استفاده از افزونه Geostatistic در نرم‌افزار ArcGIS و پس از اطمینان از وجود شروط لازم برای استفاده در مطالعات زمین‌آماري شامل عدم وجود روند در داده‌ها، وجود تعداد زوج نقاط کافی برای ترسیم تغییرنا و عدم تخمین مقدار تغییرنا برای فواصل بیش از نصف حداکثر فاصله بین نقاط، بر روی داده‌های آزمایشی اجرا شد. بدیهی است همه

جدول ۱- شاخص‌های سنجش‌ازدوری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای و چگونگی محاسبه آن‌ها.

Table 1. Remote sensing indices from satellite imagery and how to calculate them.

تعریف Definition	توضیحات Description	علائم متغیرهای کمکی Symbol of covariate
Wavelength of 0.433 μm – 0.453 μm	Aerosol/Coastal (ذرات معلق/ساحلی)	Aerosol/ Coastal
Wavelength of 0.450 μm – 0.515 μm	Blue band (باند آبی)	Blue
Wavelength of 0.525 μm – 0.600 μm	Green band (باند سبز)	Green
Wavelength of 0.630 μm – 0.680 μm	Red band (باند قرمز)	RED
Wavelength of 0.845 μm – 0.885 μm	(باند مادون قرمز نزدیک) Near Infrared Band	NIR
Wavelength of 1.560 μm – 1.660 μm	(مادون قرمز طول موج کوتاه ۱) Shortwave Infrared Band 1	SWIR1
Wavelength of 2.100 μm – 2.300 μm	(مادون قرمز طول موج کوتاه ۲) Shortwave Infrared Band 2	SWIR2
$n = \frac{(n * (1 - 0.25n) \times \frac{(RED - 0.125)}{(1 - RED)})}{(2 \times (NIR^2 - RED^2) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times RED)}$	(شاخص جهانی پایش متغیرهای محیطی) Global Environmental Monitoring Index	GEMI
$\frac{(NIR - SWIR2)}{(NIR + SWIR2)}$	(شاخص نسبت سوختگی نرمال شده) Normalized Burn Ratio Index	NBRI
$\frac{(NDVI + 0.5)}{((NDVI + 0.5))} \times \sqrt{((NDVI + 0.5))}$	(شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده) Corrected Transformed Vegetation Index	CTVI
$\frac{NIR}{RED}$	(شاخص نسبت پوشش گیاهی) Ratio Vegetation Index	RVI
$(RVI-1)/(RVI+1)$	(شاخص گیاهی نسبت نرمال شده) Normalized Ratio Vegetation Index	NRVI
$NIR - RED$	(شاخص تفاوت گیاهی) Difference Vegetation Index	DVI
$\frac{(NIR)}{(RED + SWIR2)}$	(شاخص پوشش گیاهی سطح ویژه برگ) Specific Leaf Area Vegetation Index	SLAVI
$\left(\frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)}\right) \times (1 + L)$	(شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده برای خاک) Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI
$\left(\frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)}\right) \times (1 + L) - \left(\frac{SWIR2}{2}\right)$	(شاخص کل پوشش گیاهی اصلاح شده برای خاک) Soil-Adjusted Total Vegetation Index	SATVI
$\frac{(2 \times (NIR + 1) - \sqrt{((2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED))})}{2}$	(شاخص تعدیل شده پوشش گیاهی اصلاح شده برای خاک ۱) Modified Soil-Adjusted Vegetation Index 1	MSAVI1
$\frac{(Green - SWIR1)}{(Green + SWIR1)}$	(شاخص تعدیل شده آب تفاضلی نرمال شده) Modified normalized difference water index	MNDWI

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

تعریف Definition	توضیحات Description	علائم متغیرهای کمکی Symbol of covariate
$2.5 \times \left(\frac{NIR - RED}{NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1} \right)$	(شاخص پوشش گیاهی تقویت شده ۱) Enhanced Vegetation Index 1	EVI1
$2.4 \times \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + 1} \right)$	(شاخص پوشش گیاهی تقویت شده ۲) Enhanced Vegetation Index 2	EVI2
$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده) Normalized Difference Vegetation Index	NDVI
$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$	(شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده سبز) Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI
$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	(شاخص آب تفاضلی نرمال شده) Normalized difference Water Index	NDWI

توجه: در جدول بالا L ضریب تصحیح روشنایی خاک است که برای بیش تر انواع پوشش‌های زمین معادل ۰/۵ فرض می‌شود

Note: L is soil brightness correction factor, which is assumed as 0.5 for most land cover types

جدول ۲- متغیرهای محیطی استخراج شده از مدل ارتفاع رقومی و تعاریف آن‌ها.

Table 2. Environmental variables extracted from digital elevation model and their definitions.

توضیحات Description	علائم متغیرهای کمکی Symbols of Covariates
Wetness index (شاخص خیس)	WI
Convergence index (شاخص همگرایی)	Convergen
Diurnal Anisotropic Heating (گرمایش ناهمسانگرد روزانه)	DAH
Overland Dist flow (جریان ناحیه‌ای روی خشکی)	OverDistFlow
The Wind Effect (تأثیر باد)	WindEffect
Drainage basin (مناطق زهکشی)	DrainBas
Cluster (منطقه مطالعاتی را به تعدادی خوشه‌های یکنواخت تقسیم می‌کند)	Cluster
Cross- sectional curvature (انحنای برش عرضی)	CrossCurve
Slope angle (%) (درجه شیب)	Slope (شیب)
(منطقه‌ای از زمین که روان‌آب‌ها به یک محدوده مشخص جمع می‌شوند) Catchment area, the area of land where runoff collects to a specific zone (حوضه آبریز، محدوده‌ای که روان‌آب‌ها در یک ناحیه خاص جمع می‌شوند)	CatchmentArea
Landform (شکل زمین)	Geomorphons
Distance from main river (فاصله از آبراه اصلی)	DistRiverFinal
Relative slope position (موقعیت نسبی شیب)	Relative Slope Position

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

توضیحات Description	علائم متغیرهای کمکی Symbols of Covariates
Analytical hill-shading (سایه‌اندازی دامنه‌ها)	AnalyticalHillshading
Channel networks (شبکه آبراهه‌ها)	ChanelNetwork
Flow path length (طول مسیر جریان)	FlowPathLength
Effective air flow heights (ارتفاع جریان مؤثر هوا)	EffectiveAirFlowHeights
Horizontal overland flow distance (فاصله بین جریان‌های افقی روی زمین)	HorizOverFlowDist
Vertical distance to channel network (فاصله عمودی تا شبکه زهکشی)	Vertical Distance Channel
Depth of valley in meters (عمق دره‌ها بر حسب متر)	ValleyDepth
Multiple flow algorithms help to accurately estimate current accumulation (الگوریتم‌های جریان چندگانه به دقت در برآورد تجمع جریان‌های جاری کمک می‌کنند)	LS facror (فاکتور طول شیب)
Compass direction of the maximum rate of changes (جهت قطب‌نما که بیشترین نرخ تغییرات را دارد)	Aspect (جهت شیب)
Slope length (طول شیب)	SlopeLength
Elevation (ارتفاع)	Elev
Rivers (رودخانه‌ها)	Rivers (رودخانه)

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک‌ها: برخی ویژگی‌های آماری متغیرهای خاکی اندازه‌گیری شده در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد میانگین درصد رس در دشت سیستان برابر با ۱۶/۴ درصد است (جدول ۳) که براساس نظر پژوهش‌گران این مقدار در نتیجه فعالیت‌های آبرفتی و رسوب‌گذاری تغییر می‌نماید و با نتایج برخی پژوهش‌گران در منطقه سیستان همخوانی دارد (۲۵، ۴۲ و ۴۳). میانگین سیلت نیز برابر ۴۱/۵ درصد بود (جدول ۳) که با توجه به شرایط ژئومورفیک دشت سیستان (دلتای رودخانه هیرمند) دور از انتظار نیست و هم‌راستا با مطالعات پیشین است (۲۵، ۴۲ و ۴۳). هم‌چنین میانگین شن در منطقه برابر ۴۲/۱ درصد است (جدول

۳) و براساس مطالعات انجام شده حاصل فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی در منطقه می‌باشد که با یافته‌های ارائه شده در مطالعات پیشین همخوانی دارد (۴۴، ۴۵ و ۴۶). میانگین درصد رطوبت اشباع خاک‌های مورد مطالعه (۳۳/۶ درصد) هم‌راستا با مطالعات پیشین انجام شده در منطقه (۳۳/۹ درصد) است (۲۵، ۴۷ و ۴۸). میانگین میزان کربنات کلسیم معادل خاک‌های مورد مطالعه ۲۰/۴ درصد بود (جدول ۳) که هم‌راستا با یافته‌های دیگر مطالعات انجام شده در دشت سیستان است (۲۵، ۴۹ و ۵۰). به اعتقاد پژوهش‌گران در دشت‌های سیلابی و اراضی پست به دلیل نزدیک بودن آب زیرزمینی و یا زیرسطحی غنی از کربنات‌ها به سطح خاک، تجمع و فراهمی آن‌ها در خاک طبیعی است (۵۱ و ۵۲). شایان ذکر است که براساس

زیادی در دشت سیستان هستند و در منطقه تنوع قابل‌توجهی از خاک‌های بدون مشکل شوری و سدیمی بودن تا خاک‌هایی به‌شدت شور و سدیمی مشاهده گردید.

در رابطه با ظرفیت تبادل کاتیونی با میانگین $12/67$ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک (جدول ۳) مطالعات محدودی در منطقه صورت گرفته است و این میزان از مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری شده در منطقه میانکنگی ($18/72$) کم‌تر است (۴۵) که به احتمال زیاد می‌تواند به تفاوت در محتوای عوامل مؤثر بر ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه میانکنگی نسبت به کل دشت سیستان مربوط باشد. البته مقدار اندازه‌گیری شده ظرفیت تبادل کاتیونی در این پژوهش با یافته‌های سایر پژوهش‌گران که در تمامی پهنه دشت سیستان انجام شده است ($10/56$ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک)، همخوانی دارد (۵۳).

در مجموع می‌توان بیان نمود که خاک‌های مورد مطالعه دارای بافتی متوسط تا درشت با فراوانی بیش‌تر ذرات شن و سیلت هستند. ویژگی‌های منعکس‌کننده شوری و قلیائیت خاک‌ها نشان می‌دهند که منطقه مورد مطالعه دارای خاک‌های کمی شور و قلیایی است. همچنین این خاک‌ها از لحاظ محتوای کربن آلی فقیر، از لحاظ کربنات کلسیم معادل در شرایط متوسط و به لحاظ مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی شرایط ضعیف تا متوسطی را دارند.

بررسی‌های میدانی انجام شده، در ۲۵ سال گذشته به دلیل خشک‌سالی‌های شدید سطح آب زیرسطحی در این منطقه کاهش چشمگیری داشته است.

میانگین محتوای کربن آلی خاک $0/56$ درصد بود (جدول ۳) که این مقدار با یافته‌های سایر پژوهش‌گران (حدود $0/5$ درصد) همخوانی دارد (۲۸ و ۴۹) و نشان‌دهنده فقر ماده آلی در خاک منطقه مطالعاتی است. لازم به توضیح است که محتوای کربن آلی خاک در مناطق جنوبی محدوده مطالعاتی و اطراف تپه‌های شنی به دلیل بافت خاک سبک‌تر، کم‌تر بود و در قسمت‌های شمالی دشت سیستان (واقع در قسمت‌های انتهایی دلتا) به دلیل محتوای رس بیش‌تر مقدار بیش‌تری را نشان می‌دهد.

هم‌چنین میانگین واکنش خاک برابر $8/23$ بود (جدول ۳) که نشان‌دهنده حضور خاک‌های با واکنش قلیایی در خاک‌های دشت سیستان است و این نتایج همراستا با نتایج سایر پژوهش‌گران در منطقه است (۲۵ و ۴۳). از سوی دیگر میانگین قابلیت هدایت الکتریکی خاک‌های منطقه مورد مطالعه $5/78$ دسی‌زیمنس بر متر بود که نشان‌دهنده شور بودن نسبی خاک‌های دشت سیستان است و با یافته‌های دیگر پژوهش‌گران همخوانی دارد (۴۵). از سوی دیگر متغیرهای مرتبط با وضعیت سدیمی بودن خاک‌ها به نتایج گزارش شده در منطقه میانکنگی دشت سیستان نزدیک است (۴۵) ولی با یافته‌های دیگر پژوهش‌گران فاصله زیادی را نشان می‌دهد (۲۵). قابلیت هدایت الکتریکی خاک و نسبت جذب سدیم دارای تغییرات

جدول ۳- توصیف آماری ویژگی‌های خاکی اندازه‌گیری شده.

Table 3. Descriptive statistics of measured soil variables.

چولگی Skewness	کشنیدگی Kurtosis	انحراف معیار Standard Deviation	واریانس Variance	میانگین Average	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	واحد Unit	پارامتر Parameter
0.65	-0.00	8.05	64.7	16.4	43.0	0.0	%	رس (Clay)
-0.24	-0.29	15.34	235.0	41.5	83	1.0	%	سیلت (Silt)
0.46	-0.60	20.63	425.6	42.1	99	6.0	%	شن (Sand)
0.59	0.32	7.50	55.5	33.5	54.9	21.0	%	درصد رطوبت اشباع خاک Saturation Percentage of Soil
0.33	4.108	3.132	9.80	20.4	39.5	12.5	%	کربنات کلسیم معادل Calcium Carbonat Equivalent
0.73	0.30	0.27	0.07	0.6	1.46	0.1	%	کربن آلی Organic Carbon
0.15	-0.09	0.24	0.06	8.23	8.9	7.6		واکنش خاک (Soil pH)
2.45	6.00	7.75	60	5.78	39.9	0.4	dS/m	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity
3.06	10.39	66.64	4440.5	55.0	462.5	2.0	meq/	سدیم (Na)
4.36	33.50	31.96	1021.7	31.3	215.0	3.0	meq/l	مجموع کلسیم و منیزیم (Ca+Mg)
0.08	-0.29	16.78	281.4	51.5	93.0	10.0	%	درصد سدیم محلول Percentage of Soluble Sodium
5.30	41.70	15.35	235.5	11.5	113.9	1.2		نسبت جذب سدیم Sodium Adsorption Ratio
2.39	6.82	10.56	111.4	11.5	61.4	0.6	%	درصد سدیم تبادلی Exchange Sodium Percentage
1.46	2.19	8.11	65.8	12.7	49.2	1.6	cmol/kg	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation Exchange Capacity

از آن‌ها مانند رس (۲۵)، کربن آلی (۱۶)، پتاسیم و نسبت کربن به نیتروژن (۲۷) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۲۶) تغییرنمای مناسب در مناطق مختلف دنیا، مدل گوسی بوده است. شاخص تناسب مکانی که از نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه به دست می‌آید، نشان داد که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار می‌گیرد. به دلیل

مدل‌سازی مکانی: مدل‌های خطی، نمایی، کروی و گوسی برای تعیین الگوی تغییرنمای مناسب بر داده‌های آزمایشی برازش گردید و بهترین مدل تغییرنما براساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر مقدار R^2 برای ظرفیت تبادل کاتیونی، مدل گوسی انتخاب شد (جدول ۴). مطالعات متعددی بر روی ویژگی‌های خاک نشان داده است که برای برخی

تأثیر متقابل فرآیندهای آبرفتی و بادرفتی در دشت سیستان که منجر به پیچیدگی عوامل تشکیل‌دهنده خاک می‌شود (۲۸)، توزیع ویژگی‌های خاک تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (۴۳ و ۵۴). از این رو، همبستگی مکانی متوسط ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در منطقه مورد مطالعه را می‌توان ناشی از برهم‌کنش این عوامل دانست.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد در مرحله نخست برای مدل‌سازی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی، ۸۱ متغیر کمکی اعم از متغیرهای خاکی، سنجش‌ازدوری و پستی‌وبلندی انتخاب شدند و سپس بین آن‌ها و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی گرفته شد و در هر دسته متغیرهایی با همبستگی معنی‌دار در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد وارد مرحله مدل‌سازی شدند (جدول ۵). نتایج تحلیل همبستگی بین ظرفیت تبادل کاتیونی و متغیرهای کمکی نشان داد که متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع (متغیرهای وابسته به پستی و بلندی) بیش‌ترین همبستگی را با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک داشتند. بر این اساس، مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی با ارتفاع (** $0/187$ -)، عمق دره (** $0/215$) و فاصله از رودخانه (** $0/230$) همبستگی معنی‌داری را نشان دادند. همچنین، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با درصد رس (** $0/517$)، سیلت (** $0/408$)، کربن آلی (** $0/355$)، کربنات کلسیم معادل (** $0/333$) و رطوبت اشباع خاک (** $0/460$) همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد نشان داد و با واکنش خاک (** $0/146$ -) و درصد شن (** $0/505$ -) همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد نشان داد. مطالعات متعددی به همبستگی مثبت و معنی‌دار قوی بین ظرفیت تبادل کاتیونی با رس (۲۰، ۵۵ و ۵۶)، سیلت (۲۰)، کربن آلی (۲۰، ۵۵ و ۵۶) و درصد رطوبت اشباع خاک (۲۰) اشاره نموده‌اند. همچنین مطالعات متعددی نیز به همبستگی

منفی و معنی‌دار قوی بین ظرفیت تبادل کاتیونی با واکنش خاک (۵۷، ۵۸ و ۵۹) و شن (۲۰، ۵۷ و ۵۸) اشاره نموده‌اند. با توجه به این‌که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، نشان‌دهنده فراوانی مکان‌های با بار منفی است که می‌توانند کاتیون‌ها را جذب کنند (۵۷)، بنابراین انتظار می‌رود ویژگی‌های مؤثر و مسئول بار منفی در خاک ارتباط مؤثری را با ظرفیت تبادل کاتیونی داشته باشند. از این رو قابل انتظار است که رس و کربن آلی که از عوامل اصلی ایجادکننده بار منفی در خاک شناخته می‌شوند (۲۰، ۵۸ و ۵۹) رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نشان داده و در مقابل شن که نقشی در ایجاد بار منفی خاک ندارد یا به عبارت دیگر توان نگهداری کاتیون‌ها را ندارد (۲۰ و ۵۹) و عملاً حضورش در خاک با میزان رس تقابل دارد، رابطه‌ای منفی و معنی‌دار نشان دهد.

اگرچه سیلت به‌طور مستقیم بار الکتریکی ندارد، اما به‌دلیل عوامل ثانویه مانند ترکیب کانی‌شناسی (۵۹)، یا نقش در خصوصیات فیزیکی مؤثر بر استقرار گیاه و فراهمی ماده آلی می‌تواند به‌طور غیرمستقیم با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی مثبت نشان دهد. به بیان دیگر می‌توان گفت اگرچه نقش سیلت در ایجاد ظرفیت تبادل کاتیونی ناچیز است مگر این‌که با رس یا ماده آلی در نظر گرفته شود. مطالعات نشان داده است که در خاک‌های قلیایی با میزان رس قابل‌توجه کربنات کلسیم نقش مؤثرتری در ارتباط با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به خاک‌های قلیایی شنی دارد (۵۹). در مناطق خشک، کربنات کلسیم با ایجاد و تثبیت خاکدانه‌ها و افزایش استحکام برشی خاک و بهبود تخلخل و نگه‌داری آب، ساختمان خاک را تقویت می‌کند (۶۰ و ۶۱) از این رو بر رشد گیاهان و در نتیجه فراهمی ماده آلی اثر می‌گذارد. به‌عبارت دیگر کربنات کلسیم در خاک‌های قلیایی از

خاک تأیید شده است؛ به گونه‌ای که این رابطه برای رس و سیلت مثبت و برای شن منفی به دست آمد (۴۸). بنابراین، با توجه به چنین ارتباط قوی و هم‌چنین ارتباط بین اندازه ذرات با ظرفیت تبادل کاتیونی، ارتباط مثبت و معنی‌دار بین درصد رطوبت اشباع خاک با ظرفیت تبادل کاتیونی دور از انتظار نیست.

طریق اثر بر واکنش خاک (pH) و تأمین کاتیون‌های بازی و بهبود شرایط فیزیکی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی را به طور غیرمستقیم افزایش می‌دهند. هم‌چنین، پژوهش‌گران به رابطه مثبت بین رس و درصد رطوبت اشباع خاک نیز اشاره نموده‌اند (۲۰) و در دشت سیستان نیز وجود چنین رابطه قوی و معنی‌دار بین اندازه ذرات خاک و درصد رطوبت اشباع

جدول ۴- پارامترهای تغییرنا و معیارهای انتخاب مدل و کنترل اعتبار تغییرنا.

Table 4. Parameters of the variogram and model selection criteria and validity control.

ضریب تیین R ²	حداقل مجموع مربعات Residual Sum of Squares	نسبت همبستگی مکانی Spatial Correlation Ratio	تناسب مکانی Spatial Dependency C ₀ /(C ₀ +C)	دامنه تأثیر (m) Range A ₀ (m)	آستانه Sill C ₀ +C	اثر قطعه‌ای Nugget Effect C ₀	مدل Model
0.47	1799	M*	0.50	45080	75.7	56.9	خطی Linear
0.43	415	M*	0.50	101100	111.2	55.6	نمایی Exponential
0.45	562	M*	0.50	101100	98.8	49.9	کروی Spherical
0.60	289	M*	0.60	93790	150.4	59.7	گوسی Gaussian

M* نشان‌دهنده همبستگی مکانی متوسط (M indicates average spatial correlation)

جدول ۵- نتایج همبستگی متغیرهای محیطی منتخب با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک.

Table 5. Correlation results of selected environmental variables with cation exchange capacity.

(Environmental variables) متغیرهای محیطی

متغیرهای خاکی Soil variables	متغیرهای سنجش‌ازدوری Remote sensing variables	متغیرهای استخراج شده از DEM Variables derived from the DEM
pH = -0.146**	DVI= 0.097*	Aspect = 0.109**
Clay = 0.517**	NBRI= 0.116*	Chanelnetwork_1= -0.099*
Silt = 0.408**	NDWI2= 0.097*	B2_cluster = 0.156**
Sand = -0.505**	NIR= 0.169**	B3_cluster = 0.142**
OC = 0.355**	WDVI= 0.097*	Distriverfinal = 0.230**
CCE = 0.333**		Distriverfinal_2= 0.216**
SP = 0.460**		Elevation3 = 0.099*
		Elevationz = -0.187**
		GSI= -0.101*
		B1_irsimag = -0.102*
		B2_irsimag = -0.107*
		B3_irsimag = -0.104*
		Lsfactor = -0.101*
		Valeydepth = 0.215**
		Valeydepth-1= -0.99*

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده معنی داری در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد است

* and ** represent significance at the 95% and 99% probability levels, respectively

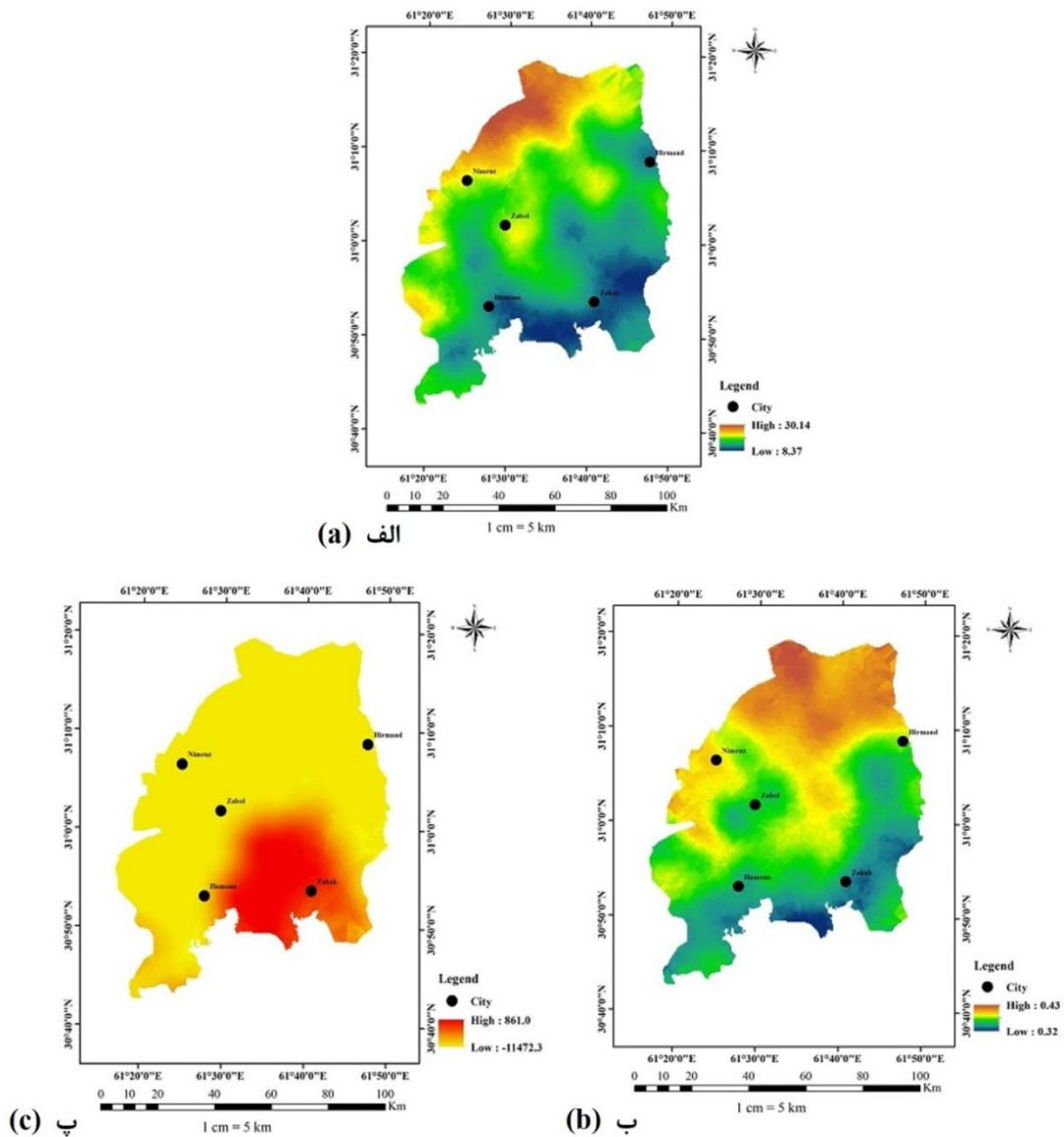
میانگین خطا (ME) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، در بین روش‌های میان‌یابی استفاده‌شده، کوکریجینگ معمولی بهترین عملکرد را نشان داد و به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای تخمین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان انتخاب شد (جدول ۶). مطالعات فراوانی نیز در سال‌های اخیر کارایی مناسب و قابل قبول روش کوکریجینگ را برای برآورد و تخمین مکانی ویژگی‌های خاک در دشت سیستان (۲۵، ۴۷ و ۶۲) و مناطق جغرافیایی مختلف (۶۳ و ۶۴) در مقایسه با سایر روش‌های زمین‌آماري گزارش نموده‌اند.

مدل‌سازی برای تمامی ۲۸ متغیر محیطی منتخب در این مطالعه (جدول ۵) به دو روش زمین‌آماري کوریجینگ و کوکریجینگ (ساده و معمولی) انجام شد که نتایج در جدول ۶ و شکل ۴ ارائه شده است. بر این اساس، در بین متغیرهای محیطی منتخب و از گروه متغیرهای خاکی، درصد رس (شکل ۴-الف)، از میان متغیرهای سنجش‌ازدوری، باند مادورن قرمز نزدیک (شکل ۴-ب) و در بین متغیرهای مستخرج از DEM، ارتفاع (شکل ۴-پ) به‌عنوان متغیرهای کمکی پیش‌بینی‌کننده ظرفیت تبادل کاتیونی برای تهیه نقشه پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفتند. براساس

جدول ۶- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماري در پهنه‌بندی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک.

Table 6. Results of the comparison of geostatistical methods in mapping cation exchange capacity.

روش Method	متغیر کمکی Auxiliary variable	مدل Model	ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	میانگین خطا Mean Error (ME)
Kriging	-	Ordinary	7.253	-0.025
	-	Simple	7.297	0.081
Inverse Distance Weghing (IDW)	-	Power1	7.296	-0.067
	-	Power2	7.442	-0.118
	-	Power3	7.735	-0.188
	-	Power3	7.735	-0.188
Co-kriging	Clay	Ordinary	7.173	-0.021
	Clay	Simple	7.527	0.089
	NIR	Ordinary	7.241	-0.002
	NIR	Simple	7.690	0.0005
	Elevation	Ordinary	7.250	-0.025
	Elevation	Simple	7.286	0.083
	Clay, NIR, Elevation	Ordinary	7.116	-0.011
	Clay, NIR, Elevation	Simple	7.301	0.053



شکل ۴- نقشه پراکنش متغیرهای محیطی منتخب در مدل‌سازی پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک؛

الف: رس، ب: امواج مادون قرمز، و پ: ارتفاع.

Figure 4. Distribution maps of selected environmental variables in modeling the spatial distribution of soil cation exchange capacity; (a) clay, (b) near infrared, and (c) elevation.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در قسمت‌های جنوب شرقی و بخش‌های جنوبی کم‌ترین مقدار است (کمتر از ۶ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) و در قسمت‌های جنوبی، شرقی و بخشی از شمال غرب منطقه مقدار کم تا متوسطی (۶-۱۲ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) مشاهده شد. با توجه به مطالعات انجام شده (۴۲، ۴۳ و ۵۴) در منطقه مورد

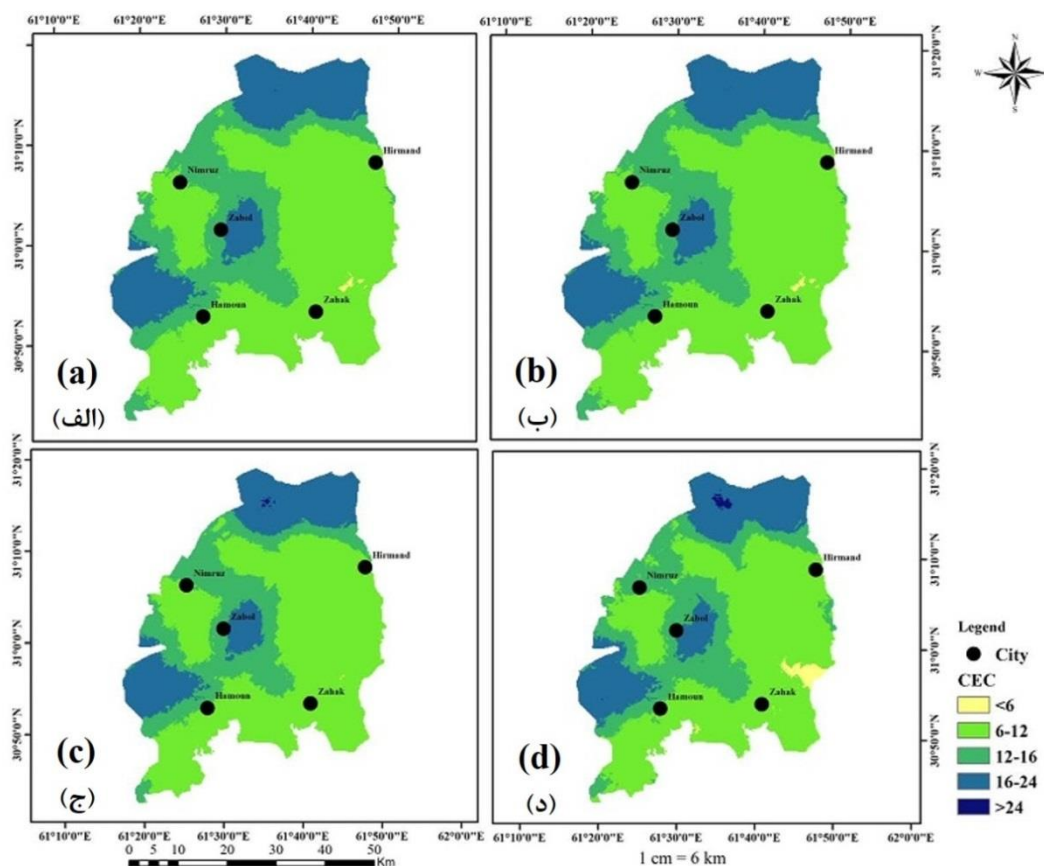
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در قسمت‌های جنوب شرقی و بخش‌های جنوبی کم‌ترین مقدار است (کمتر از ۶ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) و در قسمت‌های جنوبی، شرقی و بخشی از شمال غرب منطقه مقدار کم تا متوسطی (۶-۱۲ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) مشاهده شد. با توجه به مطالعات انجام شده (۴۲، ۴۳ و ۵۴) در منطقه مورد

مطالعاتی در دشت سیستان و سهم قابل توجه اراضی زراعی در این محدوده، مدل‌سازی مکانی آن برای کشاورزان و مدیران این حوزه دارای اهمیت فراوانی است. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین این پارامتر در دشت سیستان مقادیر کم تا متوسطی (۱۲/۶۷ سانتی‌مول در هر کیلوگرم خاک) را شامل می‌شود. همبستگی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه سیستان متوسط بود که می‌تواند به دلیل پیچیدگی‌های ژئومورفولوژی منطقه و تغییرات در محیط‌های رسوب‌گذاری باشد. همچنین، از میان متغیرهای محیطی بررسی شده در این پژوهش محتوای رس خاک‌ها از گروه متغیرهای خاکی، باند مادون قرمز نزدیک از میان متغیرهای سنجش‌ازدوری و عامل ارتفاع از سطح دریا از میان متغیرهای مستخرج از مدل ارتفاع راقومی به‌عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین متغیرهای محیطی تأثیرگذار در پیش‌بینی پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان تشخیص داده شدند. در نهایت روش کوکریجینگ معمولی با به‌کارگیری و تلفیق این سه متغیر، به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش تهیه نقشه ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در دشت سیستان انتخاب شد. به نظر می‌رسد الگوی پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به‌شدت تحت تأثیر پراکنش اندازه ذرات خاک در منطقه است. نتایج نشان دادند که به‌کارگیری متغیرهای محیطی تلفیقی که منعکس‌کننده شرایط خاک‌سازی و یا عوامل مؤثر بر آن در یک منطقه هستند، همراه با روش کوکریجینگ می‌تواند منجر به تهیه نقشه‌هایی با دقت خوب و کاربردی شود.

مطالعه به نظر می‌رسد الگوی پراکنش مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به‌شدت تحت تأثیر پراکنش اندازه ذرات خاک است. در قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی منطقه از یک سو به دلیل فعالیت مشترک رودخانه سیستان و پریان محتوای شن خاک زیاد است (۵۴). از سوی دیگر وزش بادهای ۱۲۰ روزه، ذرات شن و ماسه را از شمال به جنوب منطقه جابجا کرده و موجب رسوب‌گذاری و هم‌چنین توزیع مجدد شن می‌گردد (۴۳). هرچه از این رودخانه‌ها فاصله گرفته و به مناطق شمالی و غربی منطقه که حاشیه تالاب بین‌المللی هامون هستند نزدیک می‌شویم، به‌ترتیب سیلت و سپس رس خاک‌ها افزایش می‌یابند (۴۲، ۵۴). این تغییرات در دشت سیستان به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و اقلیمی منطقه است و به عبارت دیگر، برهم‌کنش‌های فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی موجب پیچیدگی نسبی در تغییرات ویژگی‌های خاک می‌شود (۲۸، ۴۳ و ۴۸). سایر پژوهش‌گران نیز در پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در دشت سیستان با رویکرد نقشه‌برداری راقومی خاک مشاهده کردند که در قسمت‌های جنوبی دشت سیستان و اطراف تپه‌های شنی بافت خاک سبک‌تر و در قسمت‌های شمالی و شمال غربی و غرب منطقه مقدار رس خاک به‌دلیل رسوب ذرات ریزتر انشعابات رودخانه هیرمند در اثر نزدیکی به تالاب هامون بیش‌تر می‌باشد (۶۴).

نتیجه‌گیری کلی

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک یکی از ویژگی‌های کلیدی برای مدیریت حاصلخیزی و تولید گیاهی است و با توجه به نقشه کاربری اراضی محدوده



شکل ۵- نقشه پراکنش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با: الف: متغیر کمکی رس، ب: متغیر کمکی باند مادون قرمز، پ: متغیر کمکی ارتفاع و ت: تلفیق متغیرهای کمکی.

Figure 5. Soil cation exchange capacity distribution maps considering (a) clay content, (b) near infrared band, (c) digital elevation model (DEM), and (d) combination of covariates.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: نمونه برداری و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، آماده‌سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: نظارت بر اجرای پژوهش، طراحی تحقیق، کمک به تأمین هزینه‌های اجرای پژوهش، روش‌شناسی تحقیق، ویرایش و بازنگری مقاله

نویسنده سوم: نظارت بر اجرای پژوهش، طراحی تحقیق، کمک به تأمین هزینه‌های اجرای پژوهش، روش‌شناسی تحقیق، ویرایش و بازنگری مقاله

نویسنده چهارم: کمک به تجزیه و تحلیل داده‌ها و فرآیند مدل‌سازی، طراحی تحقیق، ویرایش و بازنگری مقاله

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز به سبب تأمین هزینه‌های انجام این پژوهش (پژوهانه شماره SCU.AS1403.365) قدردانی نمایند

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول مقاله است که در دشت سیستان انجام شده است.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی بین نویسندگان وجود ندارد و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است

حمایت مالی

هزینه‌های انجام این پژوهش توسط معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز (پژوهانه شماره SCU.AS1403.365) پرداخت شده است.

منابع

1. Willaarts, B. A., Oyonarte, C., Munoz-Rojas, M., Ibanez, J. J., & Aguilera, P. A. (2016). Environmental factors controlling soil organic carbon stocks in two contrasting Mediterranean-climate areas. *Land Degradation & Development*, 27, 603-611. <https://doi.org/10.1002/ldr.2417>.
2. Sulieman, M. M., & Al-Garni, A. M. (2019). Soil organic carbon mapping and predicting based on depth intervals using kriging technique. *Eurasian Journal of Soil Science*, 8 (1), 44-53. <https://doi.org/10.18393/ejss.492466>.
3. Jeong, G., Oeverdieck, H., Park, S. J., Huwe, B., & Ließ, M. (2017). Spatial soil nutrients prediction using three supervised learning methods for assessment of land potentials in complex terrain. *Catena*, 154, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.006>.
4. Costa, E. M., Pinheiro, H. S. K., Anjos, L. H. C. D., Marcondes, R. A. T., & Gelsleichter, Y. A. (2020). Mapping soil properties in a poorly-accessible area. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 44, e0190107. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190107>.
5. Sommer, M., Gerke, H. H., & Deumlich, D. (2008). Modelling soil landscape genesis a "time slip" approach for hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*, 145, 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.012>.
6. Hou, D. (2023). Sustainable soil management for food security. *Soil Use and Management*, 39, 1-7. <https://doi.org/10.1111/sum.12883>.
7. Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York, NY.
8. Tang, L., Zeng, G. M., Nourbakhsh, F., & Shen, G. L. (2009). Artificial neural network approach for predicting cation exchange capacity in soil based on physico-chemical properties. *Environmental Engineering Science*, 26, 137-146. <https://doi.org/10.1089/ees.2007.0238>.
9. Yilmaz, I. (2006). Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85, 295-301. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.005>.
10. Keller, A., Von Steiger, B., Van der Zee, S. T., & Schulin, R. (2001). A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 30, 1976-1989. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1976>.
11. Saidian, M., Godinez, L. J., & Prasad, M. (2016). Effect of clay and organic matter on nitrogen adsorption specific surface area and cation exchange capacity in shales (mudrocks). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 1095-1106. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.064>.
12. Paz-González, A., Vieira, S. R., & Taboada, C. M. T. (2000). The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97, 273-292. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00066-5).

13. McBratney, A. B., Mendonca Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
14. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Emadi, M., Cherati, A., Heung, B., Mosavi, A., & Scholten, T. (2021). Bio-inspired hybridization of artificial neural networks: An application for mapping the spatial distribution of soil texture fractions. *Remote Sensing*, 13(5), 1025. <https://doi.org/10.3390/rs13051025>.
15. Hojati, S. (2019). Use of spatial statistics to identify hotspots of lead and copper in selected soils from north of Khuzestan Province, southwestern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(5), 654-669. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1520977>.
16. Mousavi, A., Karimi, A., Maleki, S., Safari, T., & Taghizadeh Mehrjerdi, R., (2023). Digital mapping of selected soil properties using machine learning and geostatistical techniques in Mashhad plain, northeastern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 82, 234. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10919-x>.
17. Tamiru, B., Soromessa, T., Warkineh, B., & Legese, G. (2023). Mapping Soil Parameters with Environmental Covariates and Land Cover Projection in Tropical Rainforest, Hangadi Watershed, Ethiopia. *Sustainability*, 15 (2), 1066. <https://doi.org/10.3390/su15021066>.
18. Hasani Pak, A. A. (1998). *An Introduction to Geostatistic*. Tehran University Press. 180p. [In Persian]
19. Li, J., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, 6 (3-4), 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>.
20. Selmy, S. A., Abd El-Aziz, S., El-Desoky, A., & El-Sayed, M. A. (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>.
21. Abdel-Rahman, M. A., Zakarya, Y. M., Metwaly, M., & Koubouris, G. (2021). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*, 13 (1), 194. <https://doi.org/10.3390/su13010194>.
22. Fan, X., Weng, Y., & Tao, J. (2016). Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 52, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.05.009>.
23. Ninerola, V. B., Navarro-Pedreno, J., Gomez Lucas, I., Melendez Pastor, I., & Jordan Vida, M. (2017). Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. *Journal of Geochemical Exploration*, 174, 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.06.008>.
24. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M. K., & Bogaert, P. (2022). Threedimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>.
25. Shahriari, A., Mohammadi, S. M., Shirmohammadi, E., Fatemi Ghomesheh, A., & Galavi, H. (2025). Investigating the spatial distribution of soil wind-erodible indices using geostatistical methods in the Sistan plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), 111-132. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.49372.2060>.
26. López-Castañeda, A., Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Rincón-Ramírez, J. A., & Bautista, F. (2022). Digital mapping of soil profile properties for precision agriculture in developing countries. *Agronomy*, 12(2), 353. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020353>.

27. Abdu A., Laekemariam F., Gidago G., Kebede A., & Getaneh L. (2023). Variability analysis of soil properties, mapping, and crop test responses in Southern Ethiopia. *Heliyon*, 9(3), e14013. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14013>.
28. Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M. R., Shahriari, A., & Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.048>.
29. Heydari Nesab, M. (2016). The role of wind in the creation of wind landforms in the Sistan region. M.Sc. Thesis in Climatology, University of Sistan and Baluchistan. [In Persian]
30. Afrasiab, P., & Delbari, M. (2013). Assessing the risk of soil vulnerability to wind erosion through conditional simulation of soil water content in Sistan plain, Iran. *Environmental Earth Science*, 70: 2895-2905. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2350-y>.
31. Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>.
32. Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>.
33. Helmke, P. A., & Sparks, D. L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of Soil Analysis: Part 3: Chemical Methods*, 5, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp. 551-574.
34. Chapman, H. D. (1965). Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (Ed), *Methods of Soil Analysis, part 2: Chemical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp. 891-900.
35. Ali-Ehyaeei, M. (1947). *Chemical Methods of Soils Analysis*. Soil and Water Research Institute, 131p.
36. Baver, L. (1956). *Soil Physics*. 3rd edition, John Wiley and Sons, New York.
37. Walkey, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63(4), 251-264. <https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>.
38. Gomez, C., Lagacherie, P., & Coulouma, G. (2008). Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. *Geoderma*, 148(2): 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.016>.
39. Quirk J.P. (2001). The significance of the threshold and turbidity concentrations in relation to sodicity and microstructure. *Australian Journal of Soil Research*, 39 (6), 1185-1217. <https://doi.org/10.1071/SR00050>.
40. Wulf, H., Mulder, T., Schaepman, M., Keller, A., & Jörg, P. (2014). Remote sensing of soils. Tech. Rep. 00.0338. PZ/435-0501. *University of Zurich*. 1-171.
41. Matinfar, H., Maqsoodi, Z., Mousavi, S., & Jalali, M. (2019). Evaluation of machine learning methods in digital mapping of soil organic carbon (part of Khorramabad Plain). *Journal of Water and Soil Science*. 24 (4), 327-342. <https://doi.org/10.47176/jwss.24.4.8411>. [In Persian]
42. Jamalzahi Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M., Ziaei Javaid, A., & Bameri, A. (2021). Preparation of three-dimensional maps of the size of soil particles in the floodplain of Sistan. The 17th Iranian Soil Science Congress and 4th National Farm Water Management Conference, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. [In Persian]
43. Pahlavan-Rad, M. R., & Akbari-Moghaddam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from

- eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.002>.
44. Dahmardeh, A. R., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M., Shabani, A., & Ghorbani, M. (2021). Modeling wheat yield using some soil properties at the field scale (Case study: Sistan dam research farm, university of Zabol). *Agricultural Engineering*, 44(1), 81-95. <https://doi.org/10.22055/AGEN.2021.35343.1588>.
45. Sarani, F., Ahangar, A. G., & Shabani, A. (2016). Predicting ESP and SAR by artificial neural network and regression models using soil pH and EC data (Miankangi Region, Sistan and Baluchestan Province, Iran). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 6 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1040398>.
46. Shahriari, A., Danesh Shahraki, M., Ganjali, M., & Bameri, A. (2016). The relationship between climate conditions and airborne dust abundance in Zabol and Hirmand cities. The 1st International Conference on Dust, Ahvaz, Khuzestan, Iran.
47. Jamalzehi-Samrah, Y. (2022). Threedimensional spatial modeling texture components and saturation percentage of soil in the Sistan plain. M.Sc. Thesis, Faculty of Water and Soil, University of Zabol. 186 p.
48. Jamalzehi-Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M. R., Ziaie Javid, A., & Bameri, A. (2025). Spatial modeling of soil saturation percentage using machine learning methods in Sistan Plain. *Agriculture, Environment & Society*, 5(1), 19-31. <https://doi.org/10.22034/jelsa.2025.479520.1087>.
49. Mir, H., Gholamalizadeh-Ahangar, A., & Shabani, A. (2025). Determination of the most important soil parameters affecting the availability of phosphorus in Sistan Plain using connection weight method in neural networks. *Journal of Water and Soil*, 29(6), 1674-1687. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.39564>.
50. Rezazadeh Shamkhal, S., Gholamalizadeh Ahangar, A., Gazmeh, S., Froghifar, H., & Bameri, A. (2016). Evaluation of Different Interpolation Methods in Spatial Estimation of Soil Properties in Sistan Plain. *Soil and Water Science Journal*. 26(2), 151-162.
51. Schaetzl, R. J., & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 833 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511815560>.
52. Ali-Sufi, M., & Shahriari, A. (2020). Investigation of some chemical properties and amounts of some food additives associated with dust from the Sistan Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 23(9), 99-116. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29207.1504>.
53. Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P., & Pahlavan-Rad, M. R. (2019). Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena*, 182, 104-149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>.
54. Zolfaghari, A. A., Taghizadeh Mehrjardi, R., Moshki, A., Malone, B. P., Weldeyohannes, A. O., Sarmadian, F., & Yazdani, M. R. (2016). Using the nonparametric k-nearest neighbor approach for predicting cation exchange capacity. *Geoderma*, 265, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.012>.
55. Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2016). Digital mapping of cation exchange capacity using genetic programming and soil depth functions in Baneh region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 109-126. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1038253>.
56. Emamgholizadeh, S., Bazoobandi, A., Mohammadi, B., Ghorbani, H., & Sadeghi, M. A. (2023). Prediction of soil cation exchange capacity using enhanced machine learning approaches in the southern region of the Caspian

- Sea. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(2), 101876. [https://doi.org/ 10.1016/j.asej.2022.101876](https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101876).
57. Reddy, N. N., & Das, B. S. (2023). Digital soil mapping of key secondary soil properties using pedotransfer functions and Indian legacy soil data. *Geoderma*, 429, 116265. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116265>.
58. Enang, R. K., Kips, A., Yerma, B. P. K., Kome, G. K., & Ranst, E. (2022). Function for cation exchange capacity estimation in highly weathered soils of the tropical highlands of NW Cameroon. *Geoderma Regional*, 29(2022), e00514. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00514>.
59. Agung, P. A. M., Lutfiyani, H., Hasan, M. F. R., & Salimah, A. (2023). Clayshale stabilization using liquid calcium carbonate to increase soil shear strength. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1218(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1218/1/012033>.
60. Naorem, A., Jayaraman, S., Dang, Y. P., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Rao, C. S., & Patra, A. K. (2023). Soil Constraints in an Arid Environment - Challenges, Prospects, and Implications. *Agronomy*, 13(1), 220. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010220>.
61. Hashemi, M., Gholamalizadeh Ahangar, A., Bameri, A., Sarani, F., & Hejazizadeh, A. (2016). Survey and Zoning of Soil Physical and Chemical Properties Using Geostatistical Methods in GIS (Case study: Miankangi region in Sistan). *Water and Soil*, 30(2), 443-458. [https://doi.org/ 10.22067/jsw.v30i2.25950](https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.25950). [In Persian]
62. Asadzadeh, F., Khosravi Aghdam, K., Zawareh, M., Yaghmaian Mahabadi, N., & Ramzanpour, H. (2017). Spatial variation of mineral particles of soil using remote sensing data and geostatistics to the soil texture interpretation. *Water and Soil Journal*, 32 (6), 1207-1222. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.74046>. [In Persian]
63. Owliaie, H., Salehi, A., & Zareian, G. (2024). Assessment of geostatistical models for zoning spatial distribution of some soil properties in Darengan region with different land uses, Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (1), 97-116. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2023.367197.669596>. [In Persian]
64. Pahlavan-Rad, M., Dahmardeh, K., Hadizadeh, M., Keykha, G., Mohammadnia, N., Gangali, M., Keikha, M., Davatgar, N., & Brungard, C. (2020). Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. *Catena*, 194, 104715. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>.

