

Three-dimensional mapping of soil saturation percentage using the combination of geostatistical methods and environmental variables in the Sistan Plain

Younes Jamalzahi Samareh¹, Ali Shahriari^{*2},
Mohammad Reza Pahlavan-Rad³, Alireza Ziaie Javid⁴, Abolfazl Bameri⁵

1. M.Sc. Graduate of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: younessamareh@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: shahriari.ali@uoz.ac.ir
3. Associate Prof., Soil and Water Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: pahlavanrad@gmail.com
4. Researcher, Division of Soil Formation, Classification and Survey Researches, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. E-mail: alirezaziae65@gmail.com
5. Academic Staff, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: a_bameri@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Full Paper</p> <p>Article history: Received: 07.11.2024 Revised: 09.08.2024 Accepted: 10.07.2024</p> <p>Keywords: Aeolian activities, Cokriging, Deltaic soils, DEM</p>	<p>Background and Objectives: Soil maps are crucial tools for land users and decision-makers. In recent years, there has been a significant increase in attention toward digital soil mapping, but most studies have focused on surface soils, even though land users are dealing with a three-dimensional soil body. Saturation percentage is one of the easily available physical parameters of soil moisture, which is useful in land management and can be correlated with other parameters. Although this parameter is particularly important in terms of soil water retention, which is vital in dry areas to sustain natural vegetation and agricultural activities, it has received less attention from researchers. Therefore, this study aims to digitally map the saturation percentage of soil in three dimensions and apply geostatistical methods in combination with environmental variables in the Sistan Plain, located on the Hirmand River delta in a dry climate.</p> <p>Materials and Methods: This research used data from 576 soil profiles located in the Sistan Plain. The sampling points were determined using a random supervised method, and the saturation percentage of soil was measured using the standard method at depths of 0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm, and 60-100 cm using the weighted average method. A total of 35 environmental variables extracted from satellite images (as remote sensing variables) and 22 environmental variables derived from the digital elevation model (DEM) (as land variables) were created. The environmental variables that showed significant correlation with the saturation percentage at each depth were included in the modeling and geostatistical analyses. The methods used for geostatistical analysis included the inverse distance weighting method (in first, second, and third powers), simple kriging, ordinary kriging, and simple and ordinary cokriging. All selected environmental variables were analyzed as covariates in both simple and ordinary cokriging methods. To evaluate the accuracy of the models, two statistical measures, root mean square error (RMSE) and mean error (ME), were used.</p>

Results: The results showed that the average saturation percentage at a depth of 60-100 cm was the highest (39.30%), while the lowest average was observed at a depth of 0-15 cm (33.92%). The best variogram models for the saturation percentage at the depths of 0-15 cm, 15-30 cm, and 30-60 cm were the spherical model, and for 60-100 cm, the exponential model. The spatial fit for all the studied depths was classified as medium spatial fit. The correlation results showed that remote sensing-derived variables significantly correlated only at the surface and near-surface depths (0-15 cm and 15-30 cm), while DEM-derived variables showed a significant correlation at all studied depths. These DEM variables were mainly related to fluvial and aeolian activities, which had the greatest effect on soil changes in the study area. The geostatistical estimations showed that for the first depth, the simple cokriging method with the drainage covariate, for the second depth, the simple cokriging method with the valley depth covariate, and for the third and fourth depths, ordinary cokriging with the drainage covariate were the most accurate methods. The three-dimensional mapping of soil saturation percentage revealed that the lowest values were found in the southern regions, moderate values in the central area, and the highest values in the northern part of the plain near the Hamoun wetlands. From surface to depth, the saturation percentage followed the same spatial trend, but the average value increased from surface to depth. These changes seem to correspond with the three-dimensional variations in the soil texture components in the region. Based on the three-dimensional zoning results, it is recommended that irrigation intervals be longer in the northern regions of the Sistan Plain compared to the southern areas for the same crops. In the case of natural resource management, plants with surface and deep roots should be considered in the northern regions, and trees with deep roots should be planted in the southern regions to manage vegetation and combat wind erosion.

Conclusion: The saturation percentage of soil is an easily measurable soil characteristic that should be given more attention in land management, particularly in dry regions. A three-dimensional view of soil and its mapping provides land users with a more comprehensive understanding of soil dynamics, aiding in development and planning efforts. Geostatistical methods (such as cokriging) using auxiliary variables can be highly effective for preparing digital and three-dimensional maps of soil characteristics, assisting land users in better soil management. This is contingent on using environmental variables that reflect the soil formation conditions and the factors influencing the study area.

Cite this article: Jamalzahi Samareh, Younes, Shahriari, Ali, Pahlavan-Rad, Mohammad Reza, Ziaie Javid, Alireza, Bameri, Abolfazl. 2025. Three-dimensional mapping of soil saturation percentage using the combination of geostatistical methods and environmental variables in the Sistan Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (4), 89-111.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22614.3746

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نقشه‌برداری سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌آماري و متغیرهای محیطی در دشت سیستان

یونس جمال‌زئی ثمره^۱، علی شهریاری^{۲*}، محمدرضا پهلوان راد^۳

علیرضا ضیائی جاوید^۴، ابوالفضل بامری^۵

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: younessamareh@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: shahriari.ali@uoz.ac.ir
۳. دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. رایانامه: pahlavanrad@gmail.com
۴. محقق بخش تحقیقات تشکیل، طبقه‌بندی و شناسایی خاک، مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور، کرج، ایران. رایانامه: alirezaziae65@gmail.com
۵. مربی گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: a_bameri@yahoo.com

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>سابقه و هدف: نقشه‌های خاک یکی از نیازهای مبرم برای کاربران مختلف و تصمیم‌سازان سرزمین هستند. در سال‌های اخیر توجه به نقشه‌برداری رقومی بسیار افزایش یافته است اما بیش‌تر مطالعات بر خاک سطحی تمرکز داشته است، با وجود این‌که کاربران اراضی با پیکره سه‌بعدی خاک مواجه هستند. درصد رطوبت اشباع یکی از پارامترهای فیزیکی زودیافت خاک است که در ارتباط با سایر پارامترها می‌تواند در مدیریت اراضی مورد توجه قرار گیرد. با وجود این‌که این پارامتر به‌خصوص در راستای میزان نگه‌داری آب خاک که در مناطق خشک بسیار دارای اهمیت است و برای حفظ پوشش‌های گیاهی طبیعی و همچنین فعالیت‌های کشاورزی ضروری می‌باشد، کم‌تر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. از این‌رو پژوهش حاضر با هدف نقشه‌برداری رقومی درصد رطوبت اشباع خاک به‌صورت سه‌بعدی و با استفاده از روش‌های زمین‌آماري به همراه متغیرهای محیطی در دشت سیستان که بر دلتای رودخانه هیرمند در اقلیمی خشک واقع شده است، انجام شد.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۰۳/۰۴/۲۱</p> <p>تاریخ ویرایش: ۰۳/۰۶/۱۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۷/۱۶</p>
<p>مواد و روش‌ها: جهت انجام این پژوهش اطلاعات ۵۷۶ خاک‌رخ واقع در دشت سیستان مورد استفاده قرار گرفت. روش تعیین نقاط نمونه‌برداری براساس روش نظارت شده تصادفی بوده است و درصد رطوبت اشباع خاک به روش استاندارد در عمق‌های ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۱۵۰ سانتی‌متری با استفاده از روش میانگین وزنی اندازه‌گیری شد. تعداد ۳۵ متغیر محیطی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان متغیرهای سنجش از دور و ۲۲ متغیر محیطی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع (DEM) به‌عنوان متغیرهای زمینی ایجاد شدند و متغیرهایی که همبستگی معنی‌دار با درصد رطوبت اشباع خاک در هر عمق 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، کوکریجینگ ساده و معمولی به‌عنوان روش‌های آنالیزهای زمین‌آماري مورد استفاده قرار گرفت. شایان ذکر است که همه</p>	<p>واژه‌های کلیدی: خاک‌های دلتایی، فعالیت‌های بادرقتی، کوکریجینگ، DEM</p>

متغیرهای محیطی منتخب به صورت متغیر کمکی و به صورت جداگانه در روش‌های کوکریجینگ معمولی و ساده مورد بررسی قرار گرفتند. جهت ارزیابی دقت مدل‌ها از دو آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مقدار میانگین درصد رطوبت اشباع خاک در عمق ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری دارای بالاترین میانگین (۳۹/۳۰ درصد) و در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری دارای کم‌ترین مقدار میانگین (۳۳/۹۲ درصد) بود. بهترین مدل تغییرنا برای درصد رطوبت اشباع در اعماق ۱۵-۰، ۳۰-۱۵، ۶۰-۳۰ مدل کروی و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متر مدل نمایی بود و تناسب مکانی برای همه عمق‌های مورد مطالعه در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفتند. نتایج همبستگی بین متغیرهای محیطی و درصد رطوبت اشباع خاک نشان داد که متغیرهای مشتق شده از سنجش از دور تنها در عمق اول و دوم که نزدیک به سطح زمین بودند با پارامتر درصد رطوبت اشباع خاک همبستگی معنی‌دار نشان دادند ولی متغیرهای مشتق شده از DEM در همه اعماق همبستگی معنی‌دار داشتند. این متغیرها عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی بودند که بیش‌ترین اثر را در تغییرات خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. نتایج تخمین‌گرهای زمین‌آماری نشان داد برای عمق اول روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی حوزه آبخیز، برای عمق دوم روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی عمق دره و برای اعماق سوم و چهارم کوکریجینگ معمولی با متغیر کمکی حوزه آبخیز به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش‌ها عمل نمودند. مدل‌سازی سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک نشان داد که مقدار درصد رطوبت اشباع در جنوب کم‌ترین مقادیر و در میانه دشت مقادیر متوسط و در شمال دشت در حاشیه تالاب‌های هامون بیش‌ترین مقادیر را دارا می‌باشد و از سطح به عمق درصد رطوبت اشباع با همین روند مکانی تکرار شده ولی از سطح به عمق مقدار میانگین درصد رطوبت اشباع افزایش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد تغییرات این پارامتر هم‌راستا با تغییرات سه‌بعدی اجزاء بافت خاک در منطقه است. بر اساس نتایج پهنه‌بندی سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک توصیه می‌گردد در مناطق شمالی دشت سیستان دور آبیاری با فاصله زمانی بیش‌تر نسبت به مناطق جنوبی برای محصولات کشاورزی یکسان صورت پذیرد. در عرصه‌های منابع طبیعی نیز جهت مدیریت پوشش گیاهی و به‌خصوص مقابله با فرسایش بادی گیاهان با ریشه‌های سطحی و هم‌عمیق در مناطق شمالی و درختان و گیاهان با ریشه عمیق برای مناطق جنوبی می‌تواند در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری: درصد رطوبت اشباع یک خصوصیت زودیافت مناسب است که برای مدیریت اراضی به‌خصوص در مناطق خشک باید بیش‌تر مورد توجه قرار گیرد. هم‌چنین نگاه سه‌بعدی به خاک و نقشه‌برداری آن می‌تواند درک کامل‌تری به کاربران اراضی در راستای مدیریت و برنامه‌ریزی دهد. روش‌های زمین‌آماری (کوکریجینگ) با استفاده از متغیرهای کمکی می‌توانند در تهیه نقشه‌های رقومی و سه‌بعدی خصوصیات خاک کارایی لازم را داشته باشند و به کاربران مختلف اراضی جهت مدیریت بهتر آن کمک شایانی را انجام دهند. این موضوع منوط به این یافته است که متغیرهای محیطی به‌کارگیری شوند که منعکس‌کننده شرایط خاکساز و عوامل مؤثر بر آن در مناطق مورد مطالعه باشند.

استناد: جمال‌زنی ثمره، یونس، شهریاری، علی، پهلوان راد، محمدرضا، ضیائی جاوید، علیرضا، بامری، ابوالفضل (۱۴۰۳). نقشه‌برداری سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌آماری و متغیرهای محیطی در دشت سیستان.

پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۸۹-۱۱۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.22614.3746



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک‌ها منبعی با ارزش تجدیدنابذیرند که دارای تنوع گسترده‌ای در سراسر جهان هستند و رفتار و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی دارند. درک نحوه مدیریت، کار و محافظت خاک و درک چگونگی تغییرات آن در مقیاس زمین‌نما و دستیابی به پایداری مهم و ضروری است (۱، ۲). مطالعات خاک منبع اصلی برای مدیریت کاربری اراضی و کشاورزی پایدار است (۳). خاک در بسیاری از فرآیندهای زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، شستشوی نیترات، رشد گیاهان و جنگل‌ها یک عامل کنترل‌کننده است. ویژگی‌هایی مانند اسیدیته، شوری، بافت، ساختمان، درصد رطوبت اشباع روی رفتارهای فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد.

درصد رطوبت اشباع خاک^۱ (SP) به نسبت مقدار آبی گفته می‌شود که در حالت اشباع در خاک وجود دارد. در مطالعات هیدرواکولوژیکی یکی از شاخص‌های مهم درصد رطوبت اشباع خاک است. درصد رطوبت اشباع خاک در ارتباط با اجزای سازنده خاک است و می‌تواند به عنوان پارامتری جهت برآورد و تخمین کمی ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، اجزاء بافت خاک و ظرفیت نگهداری آب خاک استفاده شود (۴). هم‌چنین درصد رطوبت اشباع خاک منعکس‌کننده برخی خصوصیات فیزیکی خاک نیز است (۵). شایان ذکر است که درصد رطوبت اشباع خاک نشان‌دهنده میزان دسترس بودن آب برای گیاه و هم‌چنین میزان حرکت املاح معدنی و آلی در خاک و به تبع آن فرآیندهای خاکسازي و تکامل پروفیلی متأثر از آن است (۴).

شناسایی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک مانند درصد رطوبت اشباع برای مدیریت اراضی ضروری می‌باشد. یکی روش‌های تعیین تغییرات مکانی خاک

استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک است. نقشه‌برداری رقومی خاک^۲ یک روش ریاضی برای ایجاد مدل‌هایی برای پیش‌بینی خصوصیات پیوسته و طبقه‌بندی خاک با استفاده از ویژگی‌های محیطی به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده است. این روش مدل‌سازی را می‌توان برای ارتباط متغیرهای کمکی محیطی و متغیر خاک هدف با استفاده از چارچوب DSM پیاده‌سازی کرد (۶)، که این روش برای پیش‌بینی فضایی ویژگی‌های خاک یک رویکرد امیدوارکننده است (۷). DSM در سال ۲۰۱۸ توسط فائو برای تهیه نقشه‌های قابل اعتماد از خصوصیات خاک برای مدیریت پایدار زمین اتخاذ شده است (۸). استفاده از روش‌های نقشه‌برداری DSM به‌عنوان وسیله‌ای برای توسعه نقشه‌های خاک با استفاده از پیشرفت‌های مدرن فناوری‌های مرتبط با محاسبات، سنجش از دور و هم‌چنین کاهش زمان و هزینه‌ها تغییر یافته است (۹).

یکی از شاخه‌های علم آمار، زمین‌آمار است که ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییرپذیری و کمی کردن غیریکنواختی فراهم می‌کند (۱۰) و شامل روش‌های مختلفی برای تخمین‌پذیری مکانی یک متغیر است (۱۱). از این‌رو، یکی از روش‌های متداول در نقشه‌برداری رقومی خاک می‌باشد. هم‌چنین، روش‌های زمین‌آماري به‌عنوان ابزارهای مناسب و قوی برای برآورد متغیرهای منطقه‌ای و ارزیابی متغیرهای مکانی در مطالعات خاکی استفاده می‌شوند (۱۲، ۱۳). تخمین زمین‌آماري شامل دو مرحله است که مرحله اول شامل شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که توسط آنالیز واریوگرام مورد بررسی قرار می‌گیرد و مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر با استفاده از توابع زمین‌آماري از جمله کریجینگ (که مقادیر متغیر را با استفاده از داده‌های موجود در همان متغیر تخمین می‌زند)، کوکریجینگ (که با

2- Digital soil mapping (DSM)

1- Saturation Percentage of Soil (SP)

رطوبت اشباع خاک یک ویژگی مهم به‌خصوص در مناطق خشک (مانند دشت سیستان) برای مدیریت اراضی از منظر تعیین پراکندگی نوع کلاس بافت خاک و همچنین در مدیریت خاک (مانند شخم، خاک‌ورزی و آیش)، آبیاری، نوع کاشت و ... است. از این‌رو، هدف این پژوهش نقشه‌برداری رقومی درصد رطوبت اشباع خاک به‌صورت سه‌بعدی در اراضی دشت سیستان با استفاده از متغیرهای محیطی و روش‌های زمین‌آماري بود.

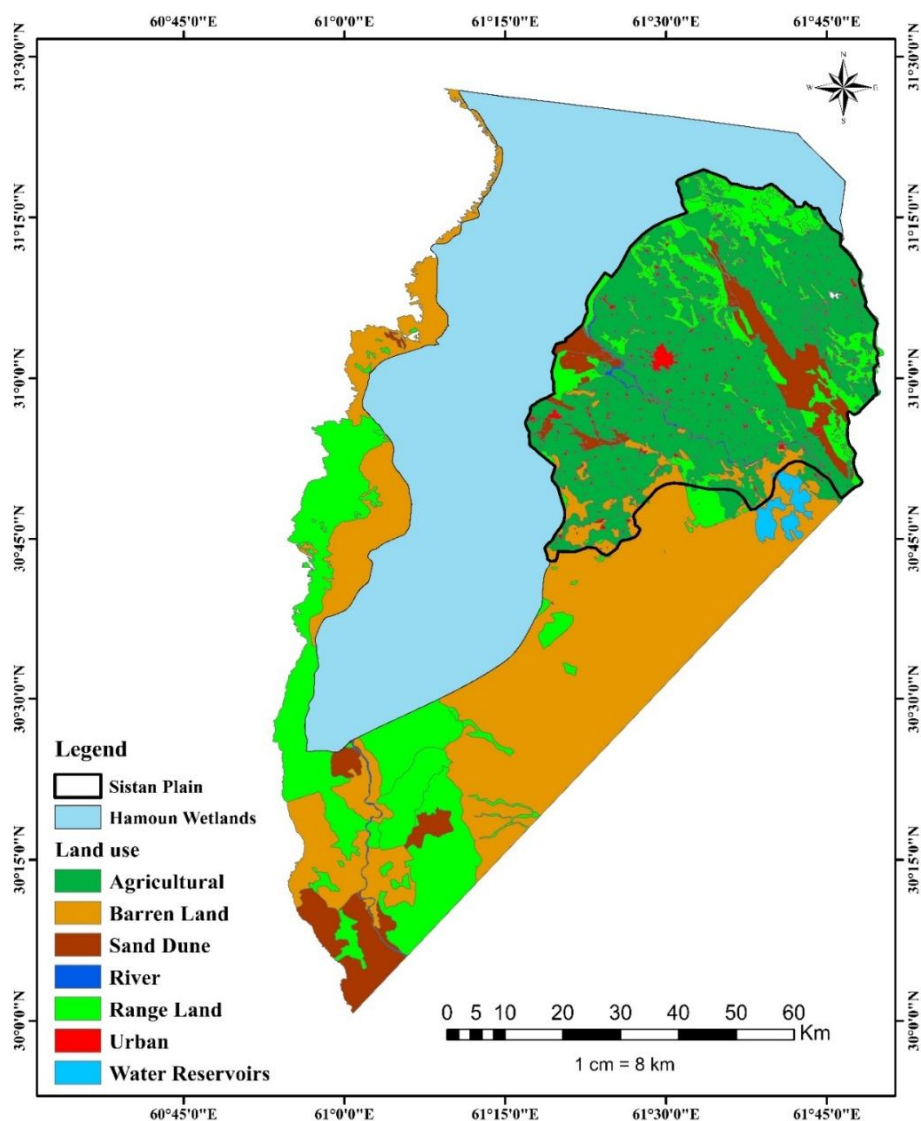
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه: دشت سیستان در جنوب‌غرب قاره آسیا و جنوب‌شرق کشور ایران و شمال استان سیستان و بلوچستان قرار گرفته است (شکل ۱). این دشت دلتایی حاصل رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای است که به‌عنوان یک جلگه پهناور شناخته می‌شود و از رودخانه هیرمند در کشور افغانستان سرچشمه می‌گیرد. وسعت منطقه مورد مطالعه حدود ۲۱۸ هزار هکتار است. این منطقه از جنوب با شهرستان زاهدان، از غرب با خراسان جنوبی و از شرق و شمال با کشور افغانستان مرز مشترک دارد (۳۰).

دشت سیستان یک دشت سیلابی و فاقد هرگونه فعالیت کوه‌زایی و طبقات ارتفاعی است و پستی و بلندی بسیار کمی دارد. ارتفاع متوسط از سطح دریا بین ۴۹۰-۴۸۰ متر و شیب منطقه بین ۱-۲ درصد متغیر است (۳۱). با توجه به خصوصیات استراتژیکی دشت سیستان دارای اقلیم گرم، خشک و بیابانی است میانگین دمای تابستانه بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای زمستانه به ۵ درجه بالای صفر می‌رسد.

استفاده از متغیرهای کمی جهت تخمین مقادیر استفاده می‌کند) و روش وزن‌دهی معکوس (که مقادیر متغیر را با استفاده از داده‌های موجود همان متغیر و توان‌های مختلف تخمین می‌زند) است (۱۰، ۱۴). امروزه با پیشرفت علوم و استفاده از فناوری‌های جدید مانند دریافت و پردازش داده‌ها از طریق ماهواره‌ها و سیستم‌های پردازش اطلاعات مانند زمین‌آمار، نقش مهمی در مدیریت منابع خاک و آب دارد و این فناوری علاوه بر این‌که موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود، باعث افزایش سرعت و دقت در انجام پروژه‌ها نیز می‌شود (۱۵، ۱۶). در چند سال اخیر مطالعات و پژوهش‌های زیادی در رابطه با پراکنش و تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مانند عناصر شیمیایی و بافت، میزان شوری و ... انجام شده است (۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰).

هئولینک و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش‌های زمین‌آماري اقدام به تهیه نقشه سه‌بعدی pH، کربن و نیتروژن آلی خاک، درصد رس، شن و جرم مخصوص ظاهری نمودند (۲۱). علاوه بر این مطالعات محدود دیگری در راستای نقشه‌برداری سه‌بعدی خصوصیات خاک مانند توزیع اندازه ذرات و کلاس بافت خاک (۲۲، ۲۳، ۲۴)، کربن آلی (۲۵، ۲۶) و شوری و قلیائیت (۲۷، ۲۸) صورت گرفته است. با این‌حال، نقشه‌برداری رقومی خاک هنوز عمدتاً به ویژگی‌های اراضی در سطح زمین محدود می‌شود، با وجود این‌که عمده کاربران نظیر کشاورزان، مهندسان، برنامه‌ریزان و متصدیان آمایش سرزمین برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، با پیکره سه‌بعدی خاک روبرو هستند (۲۹)، بنابراین توجه به نقشه‌برداری سه‌بعدی خاک ضروری می‌باشد. از سوی دیگر درصد

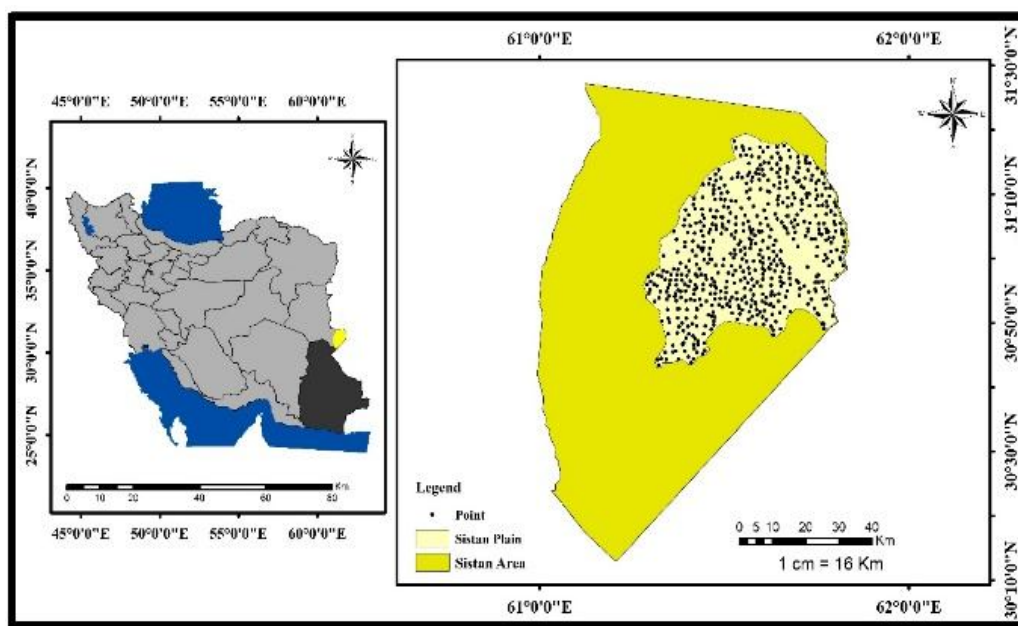


شکل ۱- نقشه کاربری اراضی منطقه سیستان.

Figure 1. Land use map of Sistan region.

اکالیپتوس (*Eucalyptus camaldulensis*)، کرته
 (*Desmostachya bipinnata*) می باشند (۳۱، ۳۲).
 نمونه برداری و روش های آزمایشگاهی: برای برآورد
 درصد رطوبت اشباع اشباع خاک از اطلاعات ۵۷۶ خاکرخ
 مورد مطالعه قرار گرفت (۳۳) که روش تعیین نقاط
 نمونه برداری براساس روش نظارت شده تصادفی بوده
 است (شکل ۲).

خاک منطقه از لحاظ رژیم رطوبتی و دمایی به ترتیب
 اریدیک و هایپرترمیک است. کاربری اراضی آن (شکل
 ۱) به سه نوع کشاورزی، بایر و غیرقابل استفاده
 (شوره زار) تقسیم می شوند و گونه های گیاهی غالب
 گیاهان شورپسند و گیاهانی که ریشه عمیق دارند
 مانند گز (*Tamarix aphylla*)، علف شور (*Salsola*
tomentosa)، خارشتر (*Alhagi camelorum*).



شکل ۲- موقعیت منطقه و خاکرخ‌ها مورد مطالعه.

Figure 2. The location of the area and the studied soil profiles.

نقشه‌برداری خاک هستند (۱، ۲، ۳۶، ۳۷). در این مطالعه از تصاویر Landsat 8 OLI در بازه‌های زمانی نمونه‌برداری که مقدار ابرناکی کم‌تر از ۱۰ درصد بود از سایت EarthExplorer.gov دانلود شد سپس تصاویر دانلودشده در نرم‌افزار ENVI 5.3 جهت انجام تصحیحات اتمسفری از ابزار FLAASH Atmospheric Correction و تصحیحات رادیومتریکی از ابزار Radiometric Calibration استفاده شد. سپس شاخص‌های مختلف با نرم‌افزار ArcGIS 10.4 محاسبه و استخراج شدند (جدول ۱). همچنین از DEM برای استخراج متغیرهای محیطی از نرم‌افزار SAGAGIS استفاده شد (جدول ۲) و پس از آن در نرم‌افزار ArcGIS 10.4 با استفاده از ابزار Extract Multi Values to Points متغیرهای هر نقطه در تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد و با استفاده از ابزار Table to Excel متغیرها به صورت جدول در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۹ ذخیره شدند.

درصد رطوبت اشباع خاک به روش استاندارد تهیه گل اشباع از نمونه‌های الک شده خاک و قرار دادن در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده است و سپس با استفاده از روش میانگین وزنی در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۹ داده‌ها دسته‌بندی و مقدار درصد رطوبت اشباع در عمق‌های ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری به صورت وزنی محاسبه شد، که برای انتخاب این اعماق براساس روش اعلام شده از سوی سازمان فائو برای تعیین عمق‌های استاندارد برای مطالعه و تهیه نقشه‌های خاک استفاده شده است (۳۴، ۳۵).

مدل‌سازی مکانی با روش زمین آماری

متغیرهای محیطی و نحوه استخراج آن‌ها: داده‌های به دست آمده از تصاویر سنجش از دور می‌توانند برای به دست آوردن اطلاعات کیفی و کمی در مورد خصوصیات خاک مورد استفاده قرار گیرند و یک منبع داده‌ای ضروری و بسیار مقرون به صرفه برای

مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل برای بر آورد متغیر وابسته (درصد رطوبت) استفاده شد.

برای محاسبه RMSE از رابطه ۱ استفاده شد:

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

که در آن، n تعداد کل داده‌ها، \hat{Y}_i مقدار پیش‌بینی شده و Y_j مقدار اندازه گیری شده است.

برای محاسبه ME از رابطه ۲ استفاده شد:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y^*(xi) - Y(xi)] \quad (2)$$

که در آن، n تعداد کل داده‌ها، $Y(xi)$ مقدار پیش‌بینی شده در نقطه نام و $Y^*(xi)$ مقدار محاسبه شده در نقطه نام است (۴۲).

نتایج و بحث

تحلیل آماری: خصوصیات چولگی و کشیدگی داده‌ها نشان می‌دهد که در همه اعماق داده‌های درصد رطوبت اشباع نرمال تا تقریباً نرمال هستند (جدول ۳).

پس از آن جهت تعیین همبستگی بین متغیرهای محیطی و پارامترهای مورد مطالعه، از ضریب همبستگی پیرسون در نرم افزار SPSS استفاده شد و متغیرهایی که همبستگی معنی‌دار با درصد رطوبت اشباع خاک نشان دادند وارد فرآیند مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری شدند و سایر متغیرها حذف شدند (۱۷، ۳۸، ۳۹) و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.4 نقشه‌های هر متغیر منتخب تهیه شد (۴۰، ۴۱).

شایان ذکر است که روش‌های آنالیزهای زمین‌آمار شامل روش وزن‌دهی معکوس فاصله (در سه حالت توان اول، دوم و سوم)، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ ساده و معمولی با استفاده از نرم‌افزارهای GS⁺ و ArcGIS انجام شد. بدیهی است همه متغیرهای محیطی منتخب به صورت متغیر کمکی و به صورت جداگانه در روش‌های کوکریجینگ معمولی و ساده مورد بررسی قرار گرفتند.

نحوه انتخاب بهترین مدل: از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) جهت مقایسه

جدول ۱- متغیرهای محیطی استخراج شده از سنجش از دور.

Table 1. Environmental variables extracted from remote sensing.

References	Definition	Description	Symbol of covariate	Definition	Description	Symbol of covariate
	NIR - RED	Difference Vegetation Index	DVI		SWIR Band	SWI1
(۴۳)	NIR/Red	Simple Ratio	SR		SWIR Band	SWIR2
(۴۴)	NIR/(Red + SWIR 2)	Specific Leaf Area Vegetation Index	SLAVI	NIR/R	NIR Band	NIR
(۴۵)	(1 + L) * (NIR - RED) / (NIR + RED + L)	Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI			coastal
(۴۶)	(Green - Swir) / (Green + swir)	Modified normalized difference water index	MNDWI			GEMI
(۴۷)	(NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L)	Enhanced Vegetation Index	EVI			NBRI
	Wavelength of 0.450-0.515 μm	Blue band of Landsat-8	Blue			CTVI
	Wavelength of 0.630-0.680 μm	Red band of Landsat-8	Red			SATVI
(۹)	Wavelength of 0.525-0.600 μm	Green band of Landsat-8	Green			NRVI
	(NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L)	Enhanced Vegetation Index	EVI2		Landsat OLI	B1

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

References	Definition	Description	Symbol of covariate	Definition	Description	Symbol of covariate
	$(NIR-RED) / (NIR + RED)$	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI		Landsat OLI	B2
	$(B5 - B3) / (B5 + B3)$	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI		Landsat OLI	B3
	$(B3 - B5) / (B3 + B5)$	Normalized difference water index	NDWI		Landsat OLI	B4
(۴۸)	$(B3 - B5) / (B3 + B5)$	Normalized difference water index	NDWI2		Landsat OLI	B5
	$(1 + L) * (NIR - RED) / (NIR + RED + L)$	Soil Adjusted Vegetation Index	SAVI_1		Landsat OLI	B6
	$(1+L)(NIR-Red) / (NIR+Red+L)$	Modified Soil-adjusted Vegetation Index	MSAVI		Landsat OLI	B7
	$(2*NIR+1-sqrt((2*NIR+1)^2-8*(NIR-Red)))/2$	Modified Soil-adjusted Vegetation Index	MSAVI2	RED-NIR	Ratio Vegetation Index	RVI

RASTERVALU

جدول ۲- متغیرهای محیطی استخراج شده از DEM.

Table 2. Environmental variables extracted from DEM.

References	Description	Symbol of covariate
-	Wetness index	Wetindex
-	Convergence index	Convergen
		Diurnal_Anisotropic_Heating
		Overland Distflow
	The Wind Effect is a dimensionless index	Wind_Effect
	Drainge basin	Drainge basin
	Cluster	Cluster
	Cross- sectional curvature	Croscurve
	Slope angle (%)	Slope
	Catchment area, the area of land where runoff collects to a specific zone	Catchment area
	Landform	Landforms
	Distance from main river	Distriverfinal
	Relative slope position	Relative_Slope_Position
	Analytical hillshading	Analytical_Hillshading
	Channel networks	Chanelnetwork
	Flow path length	Flow_Path_Length
	Effective air flow heights	Effective_Air_Flow_Heights
	Horizontal overland flow distance	Horizontal_Overland_Flow_Distance
(۹)	Vertical distance to channel network	Vertical Distance Channel
(۹) (۴۹)	Depth of valley in meters	Valley depth
(۹) (۵۰)	Multiple flow algorithms and help to accurately estimate current accumulation	LSfacor
(۵۱)	Compass direction of the maximum rate of change	Aspect

تحلیل همبستگی مکانی

تحلیل زیر تغییر نما و همبستگی آن: تغییر نمای مناسب از بین مدل های نمایی، کروی، گوسی و خطی برازش گردید و بهترین مدل تغییر نما بر اساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر مقدار R^2 انتخاب شد (جدول ۴). بهترین مدل تغییر نما برای درصد رطوبت اشباع در اعماق ۰-۱۵، ۳۰-۶۰، ۱۵-۳۰ سانتی متری مدل کروی و ۶۰-۱۰۰ سانتی متر مدل نمایی بود (شکل ۲). نسبت واریانس قطعه ای به آستانه $(\frac{C_0}{C_0 + C})$ شاخصی از قدرت ساختار متغیرهای مکانی است. اگر این نسبت کم تر از ۰/۲۵ باشد، متغیر از ساختار مکانی قوی و اگر نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد ساختار مکانی آن متوسط و اگر این نسبت بیش از ۰/۷۵ باشد، ساختار مکانی آن ضعیف خواهد بود (۵۶). تناسب مکانی برای درصد رطوبت اشباع در عمق های ۰-۱۵، ۳۰-۶۰، ۱۵-۳۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی متری در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفتند.

همچنین مقادیر درصد رطوبت اشباع در همه اعماق دارای کم ترین ضریب تغییرات هستند. ضریب تغییرات (CV) که معیار تغییر پذیری نسبی است، اگر $CV \leq 20\%$ نشان دهنده تغییر پذیری اندک، $20\% < CV < 50\%$ تغییر پذیری متوسط و اگر $50\% \leq CV < 100\%$ تغییر پذیری بالا است (۵۲). که در این مطالعه ضریب تغییرات درصد رطوبت اشباع ۲۱-۵۰٪ قرار گرفت که تغییر پذیری متوسط را نشان داد. همچنین مقدار میانگین درصد رطوبت اشباع نشان داد عمق چهارم (۶۰-۱۰۰ سانتی متری) دارای بالاترین میانگین (۳۹/۳۰ درصد) و در عمق اول (۰-۱۵ سانتی متری) دارای کم ترین مقدار میانگین (۳۳/۹۲ درصد) بود.

در خصوص تغییرات درصد رطوبت اشباع خاک دشت سیستان مطالعات محدود نشان داده که در منطقه میانکنگی در خاک سطحی میانگین (۴۶/۶۷ درصد) این خصوصیت بیش تر از میانگین آن در خاک سطحی کل دشت است (۵۳، ۵۴). با توجه به تغییرات اجزاء بافت خاک در منطقه مورد مطالعه (۵۵)، به نظر می رسد نقش این پارامترها بر تغییرات درصد رطوبت اشباع در سطح و عمق قابل توجه است.

جدول ۳- برخی خصوصیات آماری درصد رطوبت اشباع خاک.

Table 3. Some statistical characteristics of soil saturation percentage.

ضریب تغییرات C.V.	انحراف معیار Standard deviation	کشیدگی Kurtosis	چولگی Skewness	واریانس Variance	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	میان Median	میانگین Average	عمق Depth (cm)
0.22	7.45	0.59	0.41	55.55	62	3	33	33.92	0-15
0.27	9.52	1.12	0.95	90.59	74.3	2.9	33.26	35.34	15-30
0.29	11.24	0.79	0.89	126.35	74.7	2.9	35.67	38.03	30-60
0.30	11.9	0.13	0.77	141.7	75.4	6.22	36.79	39.30	60-100

میانگین متوسط و عمق ۰-۱۵ سانتی متری دارای کم ترین مقدار اثر قطعه ای بودند. نتایج آستانه نشان داد که عمق ۳۰-۶۰ سانتی متری دارای بیش ترین

نتایج حاصل از اثر قطعه ای (C_0) نشان داد که عمق ۶۰-۱۰۰ سانتی متری دارای بالاترین مقدار و عمق های ۱۵-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی متری دارای مقدار

مدل‌نمایی از مبدأ مختصات شروع می‌شود و در نزدیکی مبدأ مختصات رفتار خطی از خود نشان می‌دهد، اما آهنگ صعود آن کندتر از مدل کروی است و عملاً به سقف یا حد آستانه معینی نمی‌رسد، به همین علت دامنه تأثیر این مدل نامشخص است. علت پیدایش داده‌هایی با چنین مدل‌هایی، می‌تواند به دلیل بزرگی قابل‌ملاحظه دامنه تأثیر نسبت به ابعاد نمونه‌برداری تحت پوشش یا وجود روند در محدوده مورد بررسی باشد (۶۱). به نظر می‌رسد که پیچیدگی عوامل خاکساز در منطقه در اثر تداخل هم‌زمان فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی در دشت سیستان (۳۱) که به‌خصوص بر توزیع اندازه ذرات اثرگذار هستند (۱۷، ۶۲) و به طبع آن می‌توانند بر درصد رطوبت اشباع تأثیر بگذارند، دلیل همبستگی مکانی متوسط این پارامتر در منطقه مطالعاتی است.

مقدار و عمق‌های ۱۵-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری دارای مقدار متوسط و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری دارای کم‌ترین مقدار آستانه بودند. نتایج شعاع تأثیر نشان داد که عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری دارای بالاترین مقدار شعاع و عمق‌های ۱۵-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری دارای شعاع متوسط و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری دارای کم‌ترین مقدار شعاع تأثیر بودند. نتایج مقدار ضریب تبیین نشان داد که عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری دارای بالاترین و عمق‌های ۱۵-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری دارای مقدار متوسط و عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری دارای کم‌ترین مقدار ضریب تبیین بودند. مدل‌های کروی و نمایی بهترین برازش را بر تغییرات مکانی اغلب ویژگی‌های خاک دارند (۵۷، ۵۸). پژوهش‌های متعددی نیز نشان داده‌اند که و بهترین مدل تغییرنا برای درصد رطوبت اشباع خاک کروی (۱۳، ۵۹) و هم‌چنین نمایی (۵۴، ۶۰) بود.

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

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

R ²	RSS	میزان همبستگی	تناسب مکانی C0/(C0+C)	شعاع تأثیر A0	آستانه C0+C	اثر قطعه C0	مدل Model	عمق Depth (cm)
0.95	54.2	M*	0.50	69600	74.41	37.2	Spherical	0-15
0.97	173.0	M	0.71	120500	179.7	51.5	Spherical	15-30
0.98	153.0	M	0.72	162300	286.0	80.5	Spherical	30-60
0.96	100.0	M	0.56	101200	251.4	111.6	Exponential	60-100

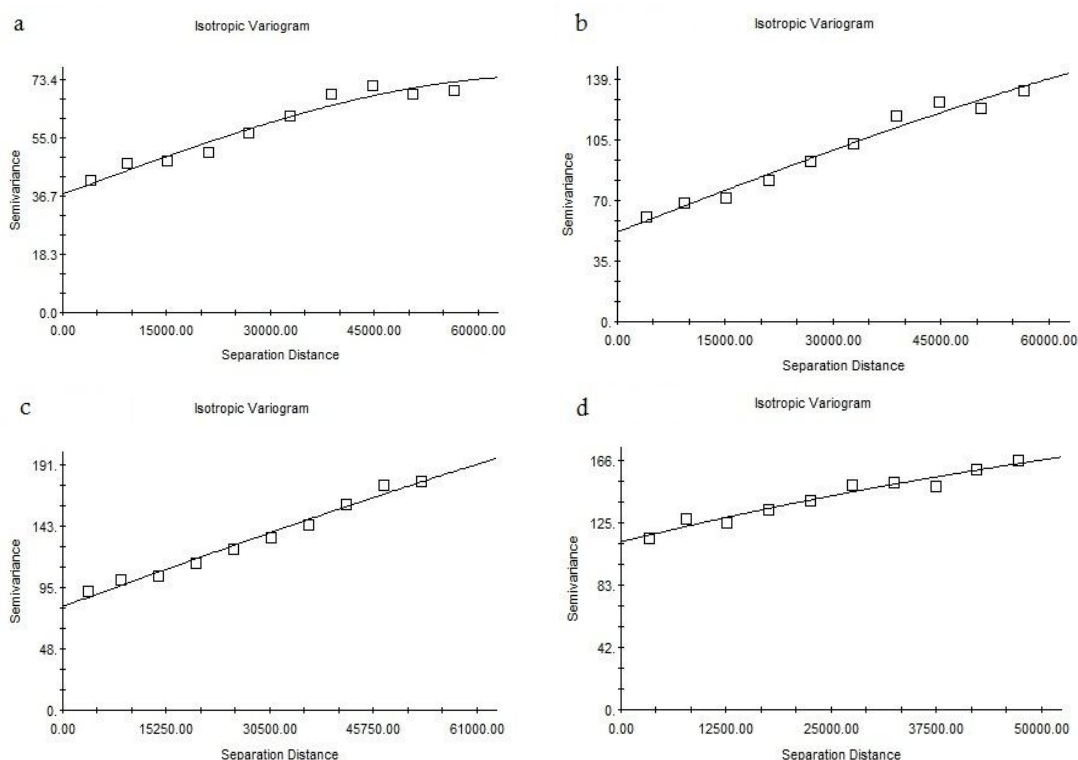
M* نشان‌دهنده همبستگی مکانی متوسط (M indicates average spatial correlation)

نمودند که در مدل‌سازی سه-بعدی خصوصیات خاک با افزایش عمق اهمیت متغیرهای کمکی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای کاهش پیدا می‌کنند (۲۲، ۶۳). پژوهش‌های متعددی بیان نموده‌اند که در مناطقی با شیب کم (کم‌تر از ۵ درصد) به دلیل تغییرپذیری کم متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، پارامترهای زمین‌نما تأثیر کم‌تری در پیش‌بینی

ارزیابی مدل‌های زمین‌آماری: نتایج همبستگی بین متغیرهای محیطی و درصد رطوبت اشباع خاک در جدول ۵ ارائه شده است. متغیرهای مشتق شده از سنجش از دور تنها در عمق اول (۱۵-۰ سانتی‌متر) و دوم (۳۰-۱۵ سانتی‌متر) که نزدیک به سطح زمین بودند با پارامتر درصد رطوبت اشباع خاک همبستگی معنی‌دار نشان دادند. مطالعات متعددی نیز تأیید

داشتند. نکته دیگر در خصوص این متغیرهای منتخب این است که عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آبرفتی (مانند عمق دره، فاصله از رودخانه، شبکه آبراهه‌ها و حوزه آبخیز) و بادرفتی (اثر باد و ارتفاع مؤثر جریان هوا) می‌باشند. دو نوع فعالیتی که بیشترین اثر را در تغییرات خاک‌ها در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند (۱۷، ۳۱، ۶۲).

خصوصیات خاک، به خصوص در سطح خاک دارند (۲۲، ۲۳). بر خلاف این یافته‌ها در همه اعماق مورد مطالعه متغیرهای مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع (متغیرهای زمینی) با درصد رطوبت اشباع در منطقه مورد مطالعه همبستگی معنی‌دار نشان دادند. در عمق سوم (۶۰-۳۰ سانتی‌متری) و عمق چهارم (۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری) تنها متغیرهای زمینی همبستگی معنی‌دار



شکل ۳- نیم تغییر نماهای درصد رطوبت اشباع عمق‌های $a=15-0$ ، $b=30-15$ ، $c=60-30$ و $d=100-60$ سانتی‌متر.

Figure 3. Semi-variograms of saturation percentage at depths $a=15-0$, $b=30-15$, $c=60-30$ and $d=100-60$ cm.

و جانبی ذرات خاک از طریق فرسایش و رسوب باشد (۲۳، ۶۴). شایان ذکر است برای مدل‌سازی مکانی با روش کوکریجینگ همه متغیرهای ارائه شده برای هر عمق در جدول ۵ با دو مدل معمولی و ساده بررسی شدند.

بر اساس مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، کوکریجینگ ساده برای عمق ۰-۱۵ سانتی‌متر با متغیر کمکی حوزه آبخیز (جدول ۶)، کوکریجینگ ساده

به عبارت دیگر متغیرهای محیطی منتخب منعکس‌کننده شرایط و عوامل خاکساز در دشت سیستان هستند. از سوی دیگر نیز به نظر می‌رسد برای پارامتر فیزیکی درصد رطوبت اشباع خاک متغیرهای مشتق‌شده از DEM در همه اعماق همبستگی بالاتری را نشان می‌دهند. دلیل ارتباط متغیرهای مستخرج از DEM و خصوصیات فیزیکی مانند اجزای بافت خاک می‌تواند مرتبط با تأثیر آن‌ها بر حرکت عمودی

آبخیز (جدول‌های ۸ و ۹) به‌عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش‌های تهیه نقشه درصد رطوبت اشباع خاک در دشت سیستان عمل نمودند.

برای عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر با متغیر کمکی عمق دره (جدول ۷)، کوکریجینگ معمولی برای عمق‌های ۳۰-۶۰، ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متر با متغیر کمکی حوزه

جدول ۵- نتایج همبستگی متغیرهای محیطی منتخب با درصد رطوبت اشباع خاک.

Table 5. Correlation results of selected environmental variables with soil saturation percentage.

عمق Depth (cm)				متغیر Variable	
60-100	30-60	15-30	0-15		
0.039	0.035	0.090*	0.086*	NIR	
0.079	0.042	0.084*	0.091*	SWIR	متغیرهای محیطی مستخرج
0.077	0.048	0.083*	0.099*	B4	از سنجش از دور
0.039	0.035	0.090*	0.086*	B5	Environmental
0.079	0.042	0.084*	0.091*	B6	variables extracted
0.077	0.048	0.083*	0.099*	Red	from remote sensing
0.173**	0.182**	0.191**	0.171*	Aspect	
0.199**	0.284**	0.322**	0.310**	Distance from main river	
-0.260**	-0.301**	-0.340**	-0.302**	Effective_Air_Flow_Heights	متغیرهای محیطی
-0.038	-0.076	-0.106*	-0.087*	Vertical Distance Channel	مستخرج از DEM
-0.098*	-0.108*	-0.128**	-0.099*	Wind Effect	Environmental
-0.266**	-0.296**	-0.326**	-0.294**	Chanel network	variables extracted
0.116**	0.181**	0.239**	0.222**	Drainage basin	from DEM
0.175**	0.178**	0.186**	0.170**	Valley depth	

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ و ۹۹ درصد

*, ** significant at probability level of 95 and 99%, respectively

خاک سطحی منطقه سیستان باشد که سبب افزایش تغییرپذیری بیش‌تر خاک شده است. شاید به همین دلیل برعکس برخی مطالعات که با افزایش عمق دقت مدل‌سازی کاهش می‌یابد (۲۳) در این پژوهش با افزایش عمق، دقت مدل‌سازی مکانی بر اساس شاخص‌های ارزیابی بهتر شده است.

همان‌طور که اشاره شده متغیرهای کمکی نهایی در مدل‌سازی زمین‌آمار نیز در همه اعماق مرتبط با فعالیت‌های آبرفتی در دشت سیستان هستند که واقع بر دلتای رودخانه هیرمند می‌باشد (۱۷، ۳۱). نتایج این پژوهش نشان داد که میزان صحت پیش‌بینی‌ها در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ کم‌تر از عمق‌های پایین‌تر بودند که علت آن احتمالاً به دلیل فرسایش شدید بادی در

جدول ۶- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی درصد رطوبت اشباع خاک در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری.

Table 6. The results of the comparison of geostatistical methods in mapping of soil saturation percentage at depth of 0-15 cm.

ME	RMSE	مدل Model	متغیر کمکی Auxiliary variable	روش Method
-0.15	18.82	Ordinary	-	Kriging
0.16	17.94	Simple	-	
-0.16	18.81	Ordinary	Driange basin	Cokriging
0.97	17.72	Simple	Driange basin	
0.2	18.81	Power1	-	IDW
0.55	20.25	Power2	-	
0.87	21.79	Power3	-	

جدول ۷- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی درصد رطوبت اشباع خاک در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری.

Table 7. The results of the comparison of geostatistical methods in mapping of soil saturation percentage at depth of 15-30 cm.

ME	RMSE	مدل Model	متغیر کمکی Auxiliary variable	روش Method
0.03	16.24	Ordinary	-	Kriging
0.23	15.51	Simple	-	
0.09	17.84	Ordinary	Valley depth	Cokriging
0.21	15.47	Simple	Valley depth	
-0.16	15.86	Power1	-	IDW
-0.01	16.52	Power2	-	
0.1	17.42	Power3	-	

جدول ۸- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی درصد رطوبت اشباع خاک در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری.

Table 8. The results of the comparison of geostatistical methods in mapping of soil saturation percentage at depth of 30-60 cm.

ME	RMSE	مدل Model	متغیر کمکی Auxiliary variable	روش Method
-0.06	10.29	Ordinary	-	Kriging
-0.17	10.13	Simple	-	
-0.04	10.06	Ordinary	Driange basin	Cokriging
-0.14	10.10	Simple	Driange basin	
-0.29	10.19	Power1	-	IDW
-0.21	10.49	Power2	-	
-0.17	10.96	Power3	-	

جدول ۹- نتایج مقایسه روش‌های زمین‌آماری در پهنه‌بندی درصد رطوبت اشباع خاک در عمق ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری.

Table 9. The results of the comparison of geostatistical methods in mapping of soil saturation percentage at depth of 60-100 cm.

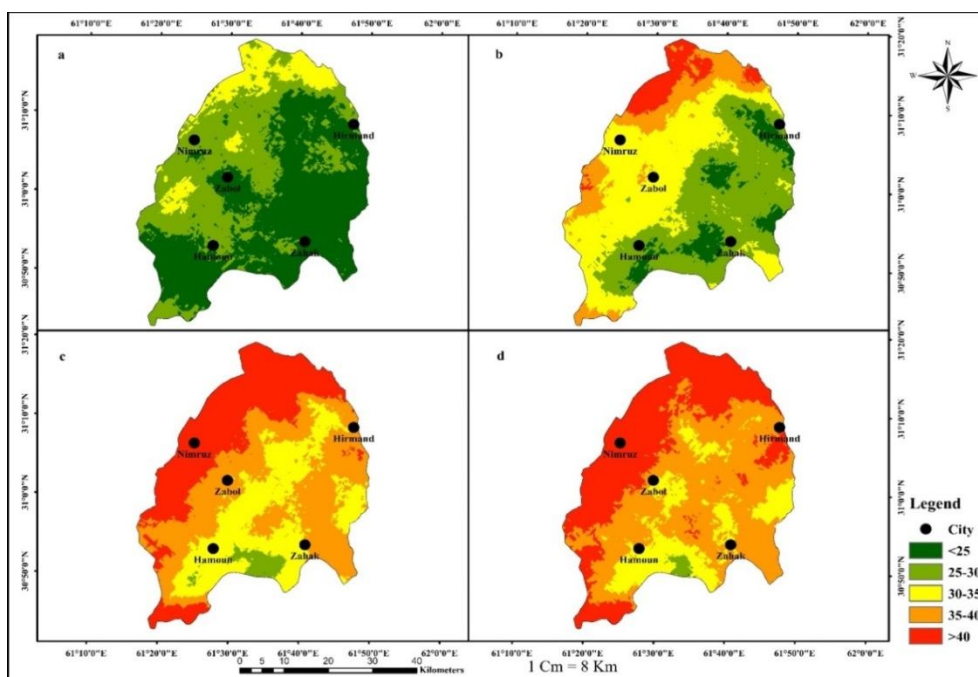
ME	RMSE	مدل Model	متغیر کمکی Auxiliary variable	روش Method
-0.12	11.50	Ordinary	-	Kriging
-0.18	11.23	Simple	-	
-0.11	11.17	Ordinary	Driange basin	Cokriging
-0.13	11.19	Simple	Driange basin	
-0.27	11.36	Power1	-	IDW
-0.28	11.71	Power2	-	
-0.29	12.22	Power3	-	

اراضی، در کلاس ۲۵-۳۰ درصد، ۳۸/۴۹ درصد اراضی، در کلاس ۳۰-۳۵ درصد، ۱۰/۱۱ درصد اراضی و در دو کلاس دیگر درصد رطوبت اشباع خاک (۴۰-۳۵ و بیش از ۴۰ درصد) درصد اراضی صفر بود. هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) بیان نمودند که روند تغییرات درصد رطوبت اشباع در خاک سطحی منطقه میانکنگی دشت سیستان، نشان دهنده الگوی پراکنشی مشابه الگوی پراکنش ذرات سیلت و رس است (۵۴). به عبارت دیگر ارتباط نزدیک و بالای درصد رطوبت اشباع خاک با اجزاء بافت خاک می‌باشد (۱۳).

پهنه‌بندی درصد رطوبت اشباع در عمق دوم (۳۰-۱۵ سانتی‌متر) نشان داد (شکل ۳) در قسمت‌های جنوبی دشت و تا حدودی در قسمت مرکزی مقدار آن کم است و هم‌چنین مقدار آن در قسمت‌هایی از مرکز مقدار متوسط داشته و در قسمت‌های شمالی دشت مقدار آن افزایش می‌یابد. در این عمق در کلاس رطوبت اشباع کم‌تر از ۲۵ درصد، ۸/۸۹ درصد اراضی، در کلاس ۲۵-۳۰ درصد، ۳۵/۸۱ درصد اراضی، در کلاس ۳۰-۳۵ درصد، ۳۶/۳۶ درصد اراضی، در کلاس ۳۵-۴۰ درصد، ۱۲/۴۷ درصد اراضی و در کلاس بیش از ۴۰ درصد، ۶/۴۷ درصد اراضی قرار گرفتند.

برخی از پژوهش‌های اقدام به مدل‌سازی مکانی درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از یک روش زمین‌آماری (کریجینگ) نمودند (۱۳، ۶۰) و به مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آماری نپرداخته‌اند. از این‌رو در این مطالعات توصیه به مقایسه روش‌های زمین‌آماری و استفاده از روش کورجینگ شده است (۶۰). هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) در منطقه میانکنگی دشت سیستان اقدام به پهنه‌بندی خصوصیات خاک نمودند و دریافتند در میان روش‌های زمین‌آماری مورد استفاده روش کورجینگ معمولی برای درصد رطوبت اشباع خاک سطحی منطقه بهترین عملکرد را دارد (۵۴). مطالعات متعددی در سال‌های اخیر نشان دادند که روش کورجینگ جهت برآورد و تخمین مکانی خصوصیات خاک از سایر روش‌های زمین‌آماری بهتر عمل می‌کنند (۶۵، ۶۶، ۶۷).

پهنه‌بندی درصد اشباع خاک: همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود مقدار درصد رطوبت اشباع در قسمت‌های جنوب و جنوب‌شرقی (کم‌تر از ۲۵ درصد) و مرکزی (۲۵-۳۰ درصد) دشت کم است و در قسمت‌های شمالی و محدوده اندکی در مرکز دشت مقدار متوسطی (۳۰-۳۵ درصد) در لایه سطحی (۱۵-۰ سانتی‌متری) دارد. در این لایه در کلاس رطوبت اشباع کم‌تر از ۲۵ درصد، ۵۱/۳۹ درصد



شکل ۴- نقشه پراکنش درصد رطوبت اشباع عمق‌های $a=0-15$ ، $b=15-30$ ، $c=30-60$ و $d=60-100$ سانتی متر.

Figure 4. Distribution map of percentage of saturated moisture at depths $a=0-15$, $b=15-30$, $c=30-60$ and $d=60-100$ cm.

حالت تعلیق در هنگام وقوع سیل می‌باشد. علاوه بر آن، این میزان بالای شن احتمالاً ناشی از رسوب بادی در طول وزش «بادهای ۱۲۰ روزه» است. بادهای شدید از شمال و شمال غربی می‌وزد و ذرات شن و ماسه را در طی ماه خرداد تا اواسط شهریور که جریان آب در رودخانه هیرمند متوقف می‌شود، موجب رسوبگذاری و هم‌چنین توزیع مجدد شن می‌شوند (۶۲). از دیگر سوی میزان سیلت نیز در محدوده اطراف رودخانه سیستان بالا است و از آنجایی که "فاصله از رودخانه" مهم‌ترین متغیر در مطالعه این پژوهش‌گران بود، به احتمال زیاد مقدار رس بالاتر در این خاک‌ها نتیجه زمان ته‌نشینی کندتر سیلت و رس از رسوبات سیلابی بالای رودخانه است (۶۲). بر این اساس به نظر می‌رسد درصد رطوبت اشباع خاک به شدت تحت تأثیر تغییرات اجزاء بافت خاک در منطقه بوده و با میزان پارامتر شن رابطه عکس داشته و با تغییرات سیلت و شن هم‌راستا است.

شهریاری و همکاران (۲۰۱۹) در مدل‌سازی مکانی اجزاء بافت خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی متری خاک‌های دشت سیستان بیان نمودند که بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه که در مجاورت رودخانه سیستان قرار دارند، دارای مقدار بیش‌تری شن هستند و شمال، شمال غرب و غرب منطقه کم‌ترین میزان شن را دارد. کم‌ترین مقدار سیلت و رس اما در قسمت‌های جنوبی منطقه دیده می‌شود.

بیش‌ترین درصد سیلت در شمال شرق، شرق و به‌ویژه غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد و درصد رس بیش‌تر در شمال و شمال غرب منطقه مورد مطالعه غالب است (۱۷). هم‌چنین پهلوان راد و اکبری مقدم (۲۰۱۸) در پژوهشی که به بررسی تغییرات اجزاء بافت خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی متر) در بخش‌های جنوب و جنوب شرقی دشت سیستان پرداختند، بیان نمودند که مقدار زیاد شن در این مناطق به دلیل نزدیکی به رودخانه سیستان است و احتمالاً در نتیجه رسوب و نشست سریع شن از

سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک به نظر می‌رسد در مناطق شمالی دشت سیستان با توجه به میزان بالای این پارامتر دور آبیاری می‌تواند با فاصله زمانی بیش‌تر نسبت به مناطق جنوبی دشت برای محصولات کشاورزی یکسان صورت پذیرد. می‌توان محصولات کشاورزی و یا گیاهان با مقاومت به خشکی بیش‌تر را برای مناطق شمالی دشت توصیه نمود. هم‌چنین در مناطق شمالی در عرصه‌های منابع طبیعی هم گیاهان با ریشه‌های سطحی و هم عمیق جهت مدیریت پوشش گیاهی و مقابله با فرسایش بادی می‌تواند در نظر گرفته شود و در مناطق جنوبی دشت بیش‌تر درختان و گیاهان با ریشه عمیق بدین‌منظور استفاده شود.

نتیجه‌گیری کلی

در مناطق خشک درصد رطوبت اشباع خاک یکی از پارامترهای زودیافت خاک است که می‌تواند برای مدیریت اراضی به‌کارگرفته شود. زیرا این خصوصیت با میزان نگهداری آب در خاک ارتباط مستقیم دارد و می‌تواند در مدیریت پوشش‌های گیاهی طبیعی و هم‌چنین فعالیت‌های کشاورزی به‌خصوص در مناطق خشک اهمیت ویژه‌ای داشته باشد. به‌ویژه این‌که به‌صورت سه‌بعدی به این خصوصیت پرداخته شود. مدل‌سازی مکانی این پارامتر با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و متغیرهای محیطی به‌صورت سه‌بعدی نشان داد که مقدار درصد رطوبت اشباع در جنوب کم‌ترین مقادیر و در میانه دشت مقادیر متوسط و در شمال دشت در حاشیه تالاب‌های هامون بیش‌ترین مقادیر را نشان داد و از سطح به عمق درصد رطوبت اشباع با همین روند مکانی در لایه‌های مورد مطالعه تغییر کرده و مقدار میانگین آن از سطح به عمق افزایش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد تغییرات هم‌راستا با تغییرات سه‌بعدی اجزاء بافت خاک در منطقه است. همبستگی مکانی این ویژگی در همه اعماق متوسط

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود تغییرات مکانی درصد رطوبت اشباع در دو عمق سوم و چهارم (به‌ترتیب ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متر) بسیار مشابه یکدیگر و هم‌راستا با عمق دوم می‌باشد. در قسمت‌های جنوبی دشت مقدار آن کم است و هم‌چنین مقدار آن در قسمت‌های مرکزی متوسط و در قسمت‌های شمالی دشت مقدار آن بیش‌ترین میزان است. در کلاس رطوبت اشباع کم‌تر از ۲۵ درصد، در هر دو عمق صفر درصد اراضی، در کلاس ۳۰-۲۵ درصد، در عمق سوم ۲/۶۳ درصد و در عمق چهارم ۰/۹۱ درصد اراضی، در کلاس ۳۵-۳۰ درصد، در عمق سوم ۲۷/۸۳ درصد و در عمق چهارم ۱۶/۴۸ درصد اراضی، در کلاس ۴۰-۳۵ درصد، در عمق سوم ۳۸/۶۴ درصد و در عمق چهارم ۴۶/۷۰ درصد اراضی، و در کلاس بیش از ۴۰ درصد، در عمق سوم ۳۰/۹۰ درصد و در عمق چهارم ۳۵/۹۰ درصد اراضی، قرار گرفتند.

جمال‌زئی ثمره و همکاران (۱۴۰۰) بیان می‌کنند که در دشت سیستان با افزایش عمق خاک میانگین اجزاء ریز بافت خاک (سیلت و رس) نسبت به سطح خاک افزایش پیدا می‌کند و از عمق ۴۰ سانتی‌متری تا ۱۰۰ سانتی‌متری نسبتاً تغییرات ثابت است (۵۵). بنابراین همان‌گونه که اشاره شده تغییرات درصد رطوبت اشباع خاک هم‌راستا با تغییرات اجزاء ریز خاک هستند (۱۳، ۵۴). به‌عبارت دیگر هم تغییرات درصد رطوبت اشباع خاک در بُعدهای طول و عرض و هم تغییرات در بعد عمق خاک هم‌راستا با تغییرات اجزاء بافت خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این تغییرات در دشت سیستان به‌شدت تحت‌تأثیر برهمکنش‌های فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی می‌باشد و موجب پیچیدگی نسبی تغییرات ویژگی‌های خاکی و خاک‌های منطقه می‌گردد (۱۷، ۳۱، ۶۲).

براساس نتایج به‌دست آمده در خصوص پهنه‌بندی

کارشناسی ارشد نویسنده اول نگارش شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آماده سازی داده ها و اندازه گیری های آزمایشگاهی، انجام محاسبات، تهیه پیش نویس مقاله. نویسنده دوم: نظارت بر پژوهش، طرح تحقیق، روش شناسی، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله. نویسنده سوم: آنالیز و مدل سازی، نظارت بر اطلاعات و داده ها، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله. نویسنده چهارم: نظارت بر اطلاعات و داده ها، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله. نویسنده پنجم: آنالیز و مدل سازی، اصلاح نهایی و بازبینی مقاله.

اصول اخلاقی نویسندگان

اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر، رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است.

بود که می تواند به دلیل پیچیدگی در عوامل مؤثر بر خاکسازي و نتیجه تغییر در محیط های رسوبگذاری و یا اختلاف در مراحل خاکسازي باشد. روش کوکریجینگ بهترین عملکرد را در تخمین درصد رطوبت اشباع داشت و متغیرهای محیطی مشتق شده از تصاویر ماهواره ای و DEM (متغیرهای زمینی) در دو عمق بالای (۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی متری) و متغیرهای محیطی مشتق شده از DEM در همه اعماق مورد مطالعه با درصد رطوبت اشباع همبستگی نشان دادند. متغیرهای کمکی منتخب و برتر مرتبط با فعالیت های بادرفتی و آبرفتی بودند. نتایج نشان داده که به کارگیری متغیرهای محیطی که منعکس کننده شرایط خاکسازي و عوامل مؤثر بر آن در یک منطقه هستند همراه با روش های زمین آماری می تواند منجر به تهیه نقشه های رقومی خصوصیات خاک با دقت خوب شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم این مقاله به جهت صرف وقت کافی و ارائه نظرات ارزشمند کمال تشکر را دارند.

داده ها و اطلاعات

این پژوهش با داده ها و اطلاعات پایان نامه

منابع

- Mulder, V., de Bruin, S., Schaepman, M., & Mayr, T. (2011). The use of remote sensing in soil and terrain mapping - a review. *Geoderma*, 62, 1-19.
- 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.
- Soil Science Division Staff. (2017). Soil survey manual. C. Ditzler, K. Scheffe, and H. C. Monger (eds.). USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Ahmad Aali, K., Parsinejad, M., & Rahmani, B. (2009). Estimation of Saturation Percentage of Soil Using Multiple Regression, ANN, and ANFIS Techniques. *Computer and Information Science*, 2 (3), 127-136.
- Stivent, G. A., & Khan, M. A. (1996). Saturation Percentage as a Measure of

- Soil Texture in the Lower Indus Basin, *Journal of SOU Sdence*. 17 (1), 255-263.
6. McBratney, A. B., Mendonca Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52.
 7. Ma, Y. X., Minasny, B., Malone, B. P., & McBratney, A. B. (2019). Pedology and digital soil mapping (DSM). *Eur. J. Soil Sci.* 70, 216-235.
 8. Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning for digital soil mapping. *Soil-Journal*, 5, 79-89.
 9. 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 Sens.* 1-23.
 10. Hasani Pak, A. A. (1998). Geostatistical. Tehran University Press. 180p [In Persian]
 11. 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.
 12. Delbari, M., Loiskandl, W., & Afrasiab, P. (2010). Uncertainty assessment of soil organic carbon content spatial distribution using geostatistical stochastic simulation. *Soil Res.* 48, 27-35.
 13. 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.
 14. Abdel-Rahman, M. A., Zakarya, Y. M., Metwaly, M., & Koubouris, G. (2021). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*, 13, 194.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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. **doi:10.1016/j.catena.2019.104149.**
 18. Zhang, Y., Ji, W., Saurette, D. D., Easher, T. H., Li, H., Shi, Z., Adamchuk, V. I., & Biswas, A. (2020). Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field-scale using regression kriging. *Geoderma*. 366, 114253.
 19. Shi, W., & Zhang, M. (2023). Progress on spatial prediction methods for soil particle-size fractions. *Journal of Geographical Sciences*, 33, 1553-1566.
 20. 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, 1066.
 21. Heuvelink, G. B., Kros, J., Reinds, G. J., & Vries, W. D. (2016). Geostatistical prediction and simulation of European soil property maps. *Geoderma Regional*, 7, 201-215.
 22. Amirian Chekan, A., Taghizadeh Mehrjerdi, R., Sarmadian, F., & Heidary, A. (2017). Three-dimensional mapping of soil texture using spline depth functions and artificial neural networks. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48 (1), 113-123. [In Persian]
 23. Emami, M., Khormali, F., Pahlavan-Rad, M. R., & Ebrahimi, S. (2024). Preparation of three-dimensional maps of soil particle size fraction by combining quantile regression forest algorithm and spline functions in the

- north of Golestan province. Iran, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (1), 51-68. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366978.669594>. [In Persian]
24. Dharumarajan, S., & Hegde, R. (2020). Digital mapping of soil texture classes using Random Forest classification algorithm. *Soil Use Manage.* 2022; 38, 135-149.
25. Jamshidi, M., Delavar, M. A., Taghizadehe-Mehrjerdi, R., & Brungard, C. (2019). Evaluating Digital Soil Mapping Approaches for 3D Mapping of Soil Organic Carbon. *Iranian Journal of Soil Research*, 33 (2), 227-239. doi: 10.22092/ijsr.2019.119764. [In Persian]
26. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M. K., & Bogaert, P. (2022). Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>.
27. Filippi, P., Jones, E., & Bishop, T. F. (2020). Catchment-scale 3D mapping of depth to soil sodicity constraints through combining public and on-farm soil databases – A potential tool for on-farm management. *Geoderma*, 374, 114396.
28. Emami, M., Khormali, F., Pahlavan-Rad, M., & Ebrahimi, S. (2024). Digital modeling of surface and subsurface soil salinity in Golestan Province, Iran. *Geoderma Regional*, 37, e00800. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00800>.
29. Zinck, J. A., Metternicht, G., Valle, H. F., & Angelini, M. (2023). *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. 2nd edition. Springer Nature Switzerland. 582.
30. Heydari Nesab, M. (2016). The role of wind in the creation of wind landforms in the Sistan region, master's thesis in climatology, University of Sistan and Baluchistan. [In Persian]
31. 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.
32. Delbari, M., Afrasiab, P., Gharabaghi, B., Amiri, M., & Salehian, A. (2019). Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12 (3), 68-86. doi:10.1007/s12517-018-4207-x.
33. Jamalzahi Samrah, Y. (2022). Three-dimensional spatial modeling texture components and saturation percentage of soil in the Sistan plain. MSc's thesis. Faculty of Water and Soil, University of Zabol. 186 p.
34. Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., & Laslett, G. M. (1999). Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines, *Geoderma*, 91, 27-45.
35. Malone, B. P., McBratney, A. B., Minasny, B., & Laslett, G. M. (2009). Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154, 138-152.
36. Agbu, P., Fehrenbacher, D., & Jansen, I. J. (1990). Soil property relationships with SPOT satellite digital data in east central Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 807-812.
37. Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Dematt, J., Taylor, G., Hill, J., Whiting, M., & Sommer, S. (2009). Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote Sens. Environ.*, 113 (1), 38-55. Imaging Spectroscopy Special Issue.
38. Aksoy, E., Panagos, P., & Montanarella, L. (2012). Spatial prediction of soil organic carbon of Crete by using geostatistics. In: Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B. (Eds.), *Digital Soil Assessments and Beyond*. CRC Press, London. 149-159.
39. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S., & Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*, 338, 445-452.

40. Wei, Y., Ding, J., Yang, S., Yang, X., & Wang, F. (2021). Comparisons of random forest and stochastic gradient treeboost algorithms for mapping soil electrical conductivity with multiple subsets using Landsat OLI and DEM/GIS-based data at a type oasis in Xinjiang, China. *European Journal of Remote Sensing*, 54 (1), 158-181. doi:10.1080/22797254.2021.1888657.
41. Bameri, A., Khormali, F., Kiani, F., & Dehghani, A. A. (2015). Spatial variability of soil organic carbon in different hillslope positions in Toshan area, Golestan Province, Iran: Geostatistical approaches. *Journal of Mountain Science*, 12 (6), 1422-1433. doi:10.1007/s11629-014-3213-z.
42. Metinfar, H., Maqsoodi, Z., Mousavi, S., & Jalali, M. (2019). Evaluation of machine learning methods in digital organic carbon mapping of agricultural soils (part of Khorram Abad plain). *Water and soil journal*. 24 (4), 343-327. [In Persian]
43. Colombo, R., Bellingeri, D., FasoUni, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sens. Environ.* 86 (1), 120-131. doi:10.1016/S0034-4257(03)00094-4.
44. Lyburner, L., Beggs, P. J., & Jacobson, C. R. (2000). Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 66, 183-191.
45. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ.* 25, 295-309.
46. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.* 27 (14), 3025-3033.
47. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ.* 83, 195-213.
48. Boettinger, J. L., Ramsey, R. D., Bodily, J. M., Cole, N. J., Kienast-Brown, S., Nield, S. J., Saundes, A. M., & Stum, A. K. (2008). Landsat spectral data for digital soil mapping. In: Hartemink, A. E., McBratney, A. B., Mendonca Santos, M. L. (Eds.), *Digital Soil Mapping With Limited Data*. Springer science, Australia. 193-203.
49. Rodriguez, F., Maire, E., Courjault-Rade, D., & Darrozes, J. (2002). The Black Top Hat function applied to a DEM: A tool to estimate recent incision in a mountainous water shed. *Geophys. Res. Lett.* 29, 91-94.
50. Boehner, J., & Selige, T. (2006). Spatial Prediction of soil Attributes Using Terrain Analysis and Climate Regionalisation. In *SAGA-Analysis and Modelling Application*; Boehner, J., McCloy, K. R., Strobl, J., Eds., *Geographische Abhandlungen: Goettinger, Germany*. 13-27.
51. Hom, B. K. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proc. IEEE.* 69, 14-47.
52. Karimi Nezhad, M. T., Tabatabaai, S. M., & Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *J. Geochem. Explor.* 152, 91-109.
53. Gholamalizade Ahangar, A., Sarani, F., Hashemi, M., & shabani, A. (2015). Comparison of Linear Regression Methods, Geostatistical and Artificial Neural Network Modeling of Organic Carbon in Dry Land of Sistan Plain, *Journal of Water and Soil.* 6 (28), 1250-1260. [In Persian]
54. 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), *Journal of Water and Soil.* 30 (2), 443-458. [In Persian]
55. Jamalzebi Samareh, Y., Shahrari, 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 seventeenth Iran Soil Science Congress and 4th National Farm Water Management Conference, Soil and Water Research Institute, Karaj. [In Persian]
56. Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 58, 1501-1511.
57. Yaghmaeian Mahabadi, N., Samiei, K., Zavvareh, M., & Ramezanpour, H. (2019). Spatial variation of some soil properties and their relationship to tea yield in Fouman region, Guilan. *Applied Soil Research*. 7 (2), 82-96. [In Persian]
58. Jiang, H. L., Liu, G. S., Liu, S. D., Li, E. H., Wang, R., Yang, Y. F., & Hu, H. C. (2012). Delineation of sitespecific management zones based on soil properties for a hillside field in central China. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58 (10), 1075-1090.
59. Marzvan, S., Asadi, H., & Davatgar, N. (2015). The effect of tillage management on spatial variation of some soil properties in steep lands. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5 (1), 97-111. [In Persian]
60. Jafarnia, S., & Akbarinia, M. (2014). Investigation of spatial distribution of soil and water properties by use of geostatistical in Mangrove forest of Qeshm Island. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22 (4), 673-686. [In Persian]
61. Vieira, S. R., & Paz Gonzalez, A. (2003). Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia*. 62 (1), 127-138.
62. Pahlavan-Rad, M. R., & Akbarimoghaddam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281.
63. Taghizadeh Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., & Malone, P. B. (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15-28.
64. Akpa, S. I. C., Odeh, I. O. A., & Bishop, T. F. A. (2014). Digital mapping of soil particle-size fractions for Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1953-1966.
65. Asadzadeh, F., Khosravi Aghdam, K., Zawareh, M., Yaghmaian Mahabadi, N., & Ramzanpour, H. (2017). Spatial changes of soil mineral particles using geostatistics and remote sensing for soil texture zoning. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 32 (7), 1222-1207. [In Persian]
66. Behnam, V., Gholamalizadeh Ahangar, A., Rahmanian, M., & Bameri, A. (2019). Spatial Distribution of Some Physical and Chemical Properties of Soil using Geostatistic Methods (Case study: Zabol to Zahedan Route). *Environment and Water Engineering*, 5 (3), 251-263. [In Persian]
67. 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. [In Persian]

