Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 2 (54)

Received:
2024-04-19

Accepted:
2024-07-23

Pages: 109-125

Assessing Soil Physical Health in Sanjaabi Plain of Kermanshah Province Using Soil Quality Indices by the Method of Principal Components Analysis

Nava Kianian[1], Afsaneh Alinejadian-Bidabadi [2*] and Parviz Shekaari [3]

1) Ph.D. Candidate, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.
2) Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.
3) Assistant professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.
*Corresponding author email: alinezhadian.a@lu.ac.ir

Abstract:

Introduction: Soil compaction is one of the worst signs of soil physical collapse, which has multiple effects on reducing its physical quality. On the other hand, parameters such as aggregate stability, bulk density, hydraulic conductivity and porosity, which are the most important indicators of soil physical quality, are usually more vulnerable to improper management due to the environmental conditions of arid and semi-arid areas. In recent decades, due to not being in tune with new technology, farmers have turned to more use of machines and agricultural chemicals in order to increase production. One of the consequences of improper land management is the compaction of the bottom layer of the plowing depth, which can be seen in almost every part of the land in Kermanshah province in recent years. This study was done as a first step in investigating this problem.

Methods: Sanjaabi plain of Kermanshah with an area of about 67,000 hectares was considered as the study area. The number of 102 points was determined by a simple systematic method. Disturbed samples were taken from the two surface layers and the bottom of the plow, as well as undisturbed samples were taken by metal cylinders from the depth of the plow pan. After Laboratory analyses, the aggregate stability was checked in both dry and wet conditions. Statistical analysis was determined using SPSS statistical software. The correlation coefficient was obtained by the Pearson method along with the correlation test. Cumulative quality indices (IQI) and Nemoro quality indices (NQI) were obtained in two collections of total data (TDS) and minimum data (MDS) through the method of principal component analysis (PCA). Then, variography and zoning of soil quality indicators were done for the spatial evaluation of soil quality using kriging method.

Results: In the surface layer and bottom of the plow, 10 and 8 principal components were able to estimate 85.02 and 80.18 percent of the total variance, respectively. The IQI correlation coefficient of the total data set with the minimum data set in the surface layer and bottom of the plow were 0.76 and 0.61, respectively, and the Nemoro index was 0.72 and 0.58 respectively. A spherical model was fitted to all the soil quality indicators in two minimum and total data sets in two surface layers of the soil and the bottom of the plow and showed a strong spatial correlation. The parts from the north to the northwest as well as the northeast of the region had higher quality soil. Other parts of the region have low to medium quality soil due to heavy tillage, reduction of organic matter, reduction of stability of aggregate and then increase of bulk density and soil compaction.

Conclusion: In general, the nature of the soil, due to the decisive effect of the parent materials, has caused a uniform type, which was evident in the texture, calcareousness and mineralogy of the clay part. Continuous and intensive agricultural operations have fueled this uniformity. In the areas with high amounts of clay in the surface layer of the soil, due to the flocculating of clay and organic matter and the subsequent increase in the aggregate stability, the quality of the soil was more suitable. But in the bottom of the plow, continuous cultivation in the region has caused the soil to become even more dense due to the low amounts of organic carbon and high amounts of clay. The results of the correlation studies showed that MDS can be used with acceptable reliability instead of TDS in the soil quality assessment in the two layers of the surface and bottom of the plow. This confidence was less in the plowing bottom, which is probably due to the excessive destruction of the soil structure as a result of its compaction and homogenization.

Keywords: Soil physical quality, Principal component analysis, Soil quality index

مقاله پژوهشی

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۲ (۵۴)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۵/۰۲

صفحات: ۱۲۵-۱۰۹

ارزیابی وضعیت فیزیکی خاک با استفاده از شاخص‌های کیفیت خاک به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در دشت سنجابی استان کرمانشاه[۱]

نوا کیانیان [۱]، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی [۲]* و پرویز شکاری [۳]

۱) دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.
۲) دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.
۳) استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: alinezhadian.a@lu.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: فشردگی خاک از بدترین نشانه‌های فروپاشی فیزیکی خاک است که اثرهای گسترده‌ای در کاهش کیفیت فیزیکی آن دارد. از سوی دیگر، پارامترهایی مانند پایداری خاکدانه، جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی و تخلخل که از مهم‌ترین نشانگرهای کیفیت فیزیکی خاک هستند، به دلیل شرایط محیطی مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولا نسبت به مدیریت نامناسب آسیب‌پذیرترند. در دهه‌های اخیر و به دلیل هماهنگ نشدن با تکنولوژی نوین، کشاورزان برای افزایش تولید به کاربرد بی‌رویه ماشین و مواد شیمیایی کشاورزی در زمین روی آورده‌اند. از پیامدهای مدیریت نامناسب زمین فشردگی لایه زیرین عمق شخم است که در سال‌های اخیر تقریبا در هر جایی از زمین‌های استان کرمانشاه دیده می‌شود. این مطالعه به عنوان یک گام اولیه در بررسی این مشکل انجام شد.

روش پژوهش: دشت سنجابی کرمانشاه به وسعت حدود ۶۷۰۰۰ هکتار به‌عنوان منطقه مطالعاتی درنظر گرفته شد. تعداد ۱۰۲ نقطه به روش سیستماتیک ساده مشخص شد. نمونه‌های دست‌خورده از دو لایه سطحی و لایه فشرده زیرین، و نمونه‌های دست‌نخورده با استوانه‌های فلزی از لایه فشرده زیرین برداشته شد. پس از انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پایداری خاکدانه‌ها در دو حالت خشک و تر بررسی شد. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS تعیین شد. ضریب همبستگی به روش پیرسون همراه با آزمون همبستگی به‌دست آمد. شاخص‌های کیفیت تجمعی (IQI) و کیفیت نمورو (NQI) در دو مجموعه کل داده‌ها (TDS) و حداقل داده‌ها (MDS) از طریق روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌دست آمد. سپس پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک جهت ارزیابی مکانی کیفیت خاک به روش کریجینگ انجام شد.

یافته‌ها: در لایه سطحی و لایه فشرده زیرین به ترتیب ۱۰ و ۸ مؤلفه اصلی توانستند ۸۵/۰۲ و ۸۰/۱۸ درصد کل واریانس را برآورد کنند. ضریب همبستگی IQI کل داده‌ها با حداقل داده در لایه سطحی و لایه فشرده زیرین به‌ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۶۱ و برای شاخص نمورو ۰/۷۲ و ۰/۵۸ به‌دست آمد. برتمامی شاخص‌های کیفیت خاک در دو مجموعه حداقل و کل داده ها در دو لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین مدل کروی برازش داده شد و همبستگی مکانی قوی نشان دادند. قسمت‌های شمال تا شمال‌غرب و هم‌چنین شمال‌شرق منطقه دارای خاک با کیفیت بالاتر بود. دیگر قسمت‌های منطقه به دلیل خاکورزی زیاد، کاهش ماده آلی، کاهش پایداری خاکدانه‌ها و به‌دنبال آن افزایش تراکم و جرم مخصوص ظاهری دارای خاک با کیفیت کم تا متوسط بودند.

نتایج: به‌طور کلی سرشت خاک به دلیل اثر قاطع مواد مادری موجب گونه‌ای یکنواختی شده که در بافت، آهکی بودن و کانی‌شناسی بخش رس آشکار بود. عملیات کشاورزی پیوسته و فشرده به این یکنواختی دامن زده است. در نواحی با مقادیر رس بالا در لایه سطحی خاک به‌دلیل هم‌آوری رس و ماده آلی و در پی آن افزایش پایداری خاکدانه‌ها، کیفیت خاک مناسب‌تر بود. و اما در لایه فشرده زیرین کشت‌وکار مداوم در منطقه به‌دلیل مقادیر کم کربن آلی و مقادیر بالای رس صرفاً باعث تراکم هرچه بیش‌تر خاک شده است. نتایج مطالعات همبستگی نشان داد که در دو لایه سطحی و لایه فشرده زیرین می‌توان MDS را با اطمینان قابل قبولی به جای TDS در بررسی کیفیت خاک به کار برد. این اطمینان در لایه فشرده زیرین کمتر بود که دلیل آن تخریب بیش از حد ساختمان خاک در نتیجه تراکم و یک‌دست شدن آن است.

واژه‌های کلیدی: کیفیت فیزیکی خاک، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت خاک

[۱] برگرفته از رساله دکتری

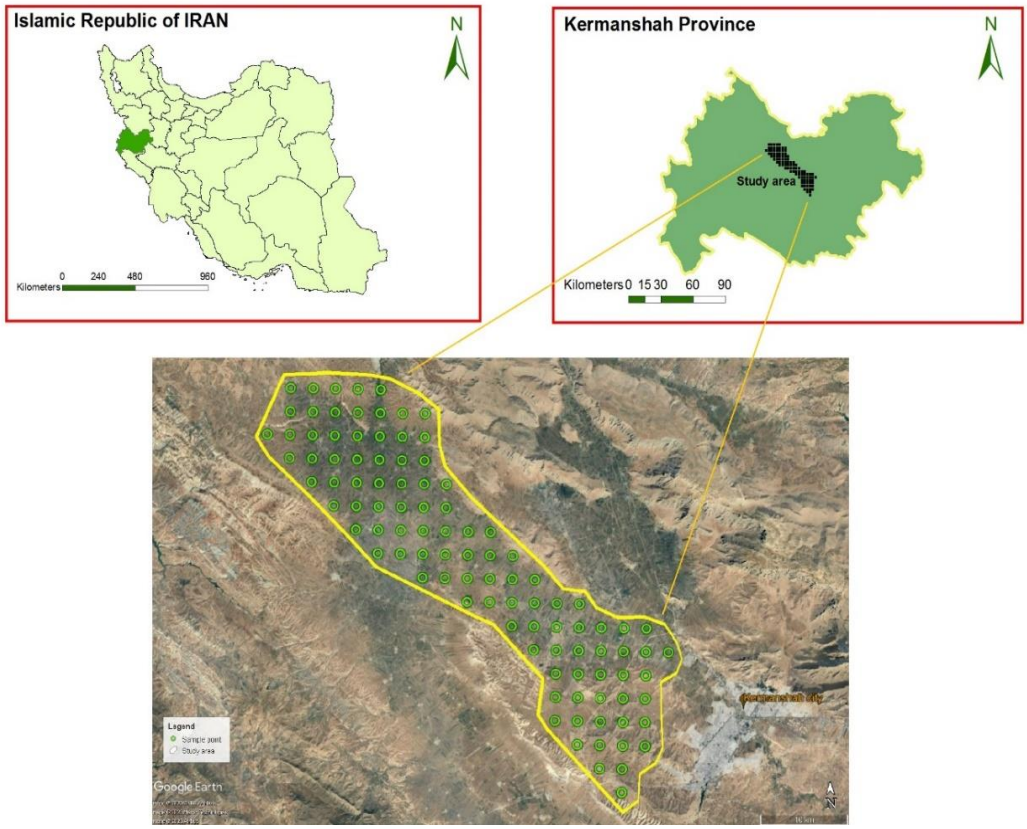
مقدمه

کیفیت خاک، ظرفیت خاک برای ایفای نقش‌های آن در اکوسیستم‌های طبیعی یا مدیریت شده است به‌گونه‌ای که بهره‌گیری گیاه و حیوان را به صورت پایدار تامین کرده، کیفیت آب و هوا را ثابت نگه داشته و یا افزایش داده و در پی آن سلامت انسان و محیط زندگی را تضمین می‌کند (Doran and Parkin, 1994; Pankhurst et al., 1997). از آنجا که تراکم خاک اثرهای گسترده‌ای در کاهش کیفیت فیزیکی خاک دارد، از بدترین نشانه‌های فروپاشی فیزیکی خاک به شمار می‌آید. تراکم بر بسیاری از ویژگی‌های بنیادین خاک مانند تخلخل (Richard *et al.*, 2001)، جرم مخصوص ظاهری (Panayiotopoulos et al., 1994)، اشباع شدن لایه سطحی و فرسایش (Gallaher et al., 1976)، تهویه (Schnurr-Putz et al., 2006)، فعالیت‌های زیست‌شناختی (Beylich et al., 2010)، هدایت هیدرولیک (Pagliai et al., 2003) و ... به‌طور کلی کیفیت فیزیکی آن، تأثیر منفی دارد. با توجه به این که بیان کمّی کیفیت خاک به صورت مستقیم مسأله‌ای دشوار است (Sojka and Upchurch, 1999)، می‌توان از شاخص‌های کیفیت خاک جهت ارزیابی آن استفاده کرد. در این شاخص‌ها مجموعه‌ای از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک مدل ریاضی با هم ترکیب و به‌صورت یک کمّیت عددی ارائه می‌شوند که این عدد به عنوان شاخص کلی کیفیت خاک مجموعه ویژگی‌های مورد نظر است (Qi et al., 2009). شاخص‌ها به‌عنوان خصوصیاتی از خاک تعریف شده‌اند که نسبت به تغییرات در عملکرد خاک حساس هستند (Kim et al., 2020). در کاربری‌های کشاورزی و زیست‌محیطی معمولا از دو شاخص (IQI)[1] و (NQI)[2] برای محاسبه کیفیت خاک استفاده می‌شود. پژوهشگران کاربرد بالای شاخص IQI و NQI را در برآورد کیفیت خاک گزارش کردند (۴۳ مقاله ۸). در مدل IQI حاصل‌ضرب مقادیر ویژگی‌های انتخاب شده در وزن ویژگی‌ها با هم جمع می‌شود که این عمل توسط یک معادله ساده صورت گرفته و در قالب یک شاخص ارائه می‌شود (Doran and Parkin, 1994). در مدل NQI که اساس آن استفاده از مقادیر میانگین و حداقل ویژگی‌ها است، وزن ویژگی‌های خاک استفاده نمی‌شود (Qin and Zhao, 2000). از آنجا که معمولا در مطالعات کیفیت خاک چندین متغیر در نظر گرفته می‌شود، ناگزیر یکی از روش‌های کاهش ابعاد داده‌ها به‌کار برده خواهد شد (Yao et al., 2013). ره‌آورد کاهش داده‌ها زیرمجموعه‌ای از کل ویژگی‌های خاک است که در برآورد کیفیت آن تأثیر تعیین‌کننده داشته و مجموعه کمینه داده[3] (MDS) نامیده می‌شود (Doran and Parkin, 1994). از جمله روش‌های تعیین حداقل مجموعه داده‌ها، می‌توان به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی[4] (PCA) اشاره کرد. این روش آماری که یکی از پرکاربردترین روش‌های تجزیه و تحلیل چند متغیره داده‌هاست، با هدف صرفه‌جویی در هزینه و وقت، و دوری از همپوشانی اطلاعات نهفته در متغیرها در یک مجموعه، برای تبدیل مجموعه مشاهدات با متغیرهای همبسته به مجموعه‌ای کوچک‌تر با متغیرهای مستقل (مؤلفه‌های اصلی) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Liu et al., 2003). طی مطالعه‌ای در ایالت کراس‌ریدر نیجریه که بر روی ۱۱۰ نمونه خاک سطحی صورت گرفت، از روش PCA بهره گرفته شد. در این پژوهش تعداد ۱۱ ویژگی به عنوان مجموعه کل داده‌ها و پایداری ساختمان خاک، درصد شن، کربن آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه به عنوان مجموعه حداقل داده در بررسی کیفیت خاک انتخاب شد (Isong et al., 2022). در پژوهشی دیگر به منظور انتخاب شاخص کیفیت خاک مناسب برای اکوسیستم مرتع در منطقه نیمه‌خشک آذربایجان شرقی به روش تجزیه به مؤلفه اصلی تعداد ۷ ویژگی به عنوان MDS در نظر گرفته شد. از بین شاخص‌ها، شاخص نمورو با مجموعه حداقل ویژگی به‌عنوان مناسب‌ترین روش ارزیابی شناخته شد (Karkaj et al., 2019). هم‌چنین Zhou و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی کیفیت خاک شمال‌شرق چین از روش PCA بهره بردند و کارایی این روش را در برآورد کیفیت خاک تأیید کردند.

داشتن اطلاعات دقیق و قابل اعتماد در مورد ویژگی‌های کیفی خاک در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی می‌تواند نقش مهمی در اعمال مدیریت صحیح اراضی توسط کارشناسان و کشاورزان داشته باشد. دشت سنجابی استان کرمانشاه که یکی از دشت‌های وسیع کشاورزی در غرب کشور است که به شدت زیر کشت و کار فشرده قرار دارد. با توجه به این که تا به امروز در دشت سنجابی، بررسی وضعیت فیزیکی خاک و تراکم مورد مطالعه قرار نگرفته است، شناسایی وضعیت موجود و اندازه تخریب ویژگی‌های خاک مرتبط می‌تواند راهگشای مطالعات تفصیلی‌تر در سطح مزرعه، گزینش راهبردهای مناسب در راستای اعمال مدیریت پایدار اراضی در منطقه با هزینه و وقت کمتر در راستای جلوگیری از پیشرفت تخریب و نیز بازسازی آن باشد.

مواد و روش‌ها

بخشی از دشت سنجابی استان کرمانشاه در محدوده‌ی عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی با مساحت نزدیک به ۶۷/۰۰۰ هکتار به‌عنوان منطقه مطالعاتی برگزیده شد (شکل ۱). موقعیت ۱۰۲ نقطه جهت نمونه‌برداری بر پایه روش سیستماتیک ساده در محیط برنامه‌نویسی R (R. core Team, 2021) و به کمک بسته نرم‌افزاری SDrawNPS (McDonald, 2015) تعیین و پس از بازیابی توسط یک دستگاه GPS دستی مدل GARMIN Map 78s نمونه‌برداری انجام گردید.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه برداری در باختر شهرستان کرمانشاه در منطقه سنجابی

تعداد شش نقطه روی رخنمون سنگی قرار گرفتند و نمونه‌برداری ممکن نشد. از هر نقطه، دو نمونه دست‌خورده از لایه‌های رویین (عمق تقریبی ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) و زیرین خاک (عمق تقریبی ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) برداشته شد. نمونه‌های دست‌نخورده از لایه متراکم زیرین خاک به کمک استوانه‌های فلزی به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر گرفته شد. در هر نقطه، سه نمونه دست‌نخورده در یک الگوی مثلثی گرفته شد و میانگین نتایج سه اندازه‌گیری گزارش گردید (شکل ۲).

شکل ۲. آرایش مثلثی استوانه‌های نمونه‌برداری از لایه فشرده زیرین در منطقه مطالعاتی

درصد شیب زمین در هر نقطه توسط شیب‌سنج دستی Abney Level و عمق لایه فشرده زیرین حین نمونه‌برداری از این لایه به‌دست آمد. نوع سیستم خاکورزی مورد استفاده و نوع کاربری زمین (آبی، دیم، مرتع) در هر نقطه طی مصاحبه حضوری از کشاورزان محلی به‌دست آمد. نمونه‌ها بعد از هوا خشک شدن و کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (Page et al., 1992a)، ویژگی‌های شیمیایی شامل کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تبادلی با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری، مقدار سدیم و پتاسیم با استفاده ازدستگاه فلیم‌فوتومتر و کلسیم و منیزیم از طریق تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Page et al., 1992b). رسانش الکتریکی در عصاره ۲/۵ : ۱ با استفاده از دستگاه رسانش‌سنج الکتریکی، درصد کربن آلی به روش تعدیل شده واکلی- بلک و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Page et al., 1992b) به‌دست آمد. درصد رطوبت اشباع نیز به روش وزنی تعیین شد. جرم‌مخصوص ظاهری در استوانه‌های نمونه‌برداری تعیین گردید. پس از به اشباع رساندن استوانه‌های نمونه‌برداری میزان هدایت هیدرولیک اشباع تحت بار هیدرولیکی ثابت و زمان اشباع شدن نمونه‌ها به‌دست آمد و درصد تخلخل خاک در آنها اندازه‌گیری شد (Page et al., 1992a). بخش دیگری از نمونه‌های خاک هوا خشک شده از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) و میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD) به دو روش الک تر و الک خشک به صورت جداگانه به روش دیلینهر و دیبوت (De Leenheer and De Boodt, 1959) تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS[5] تعیین شد. ضریب همبستگی به روش پیرسون[6] همراه با آزمون همبستگی به‌دست آمد. سپس با استفاده از روش PCA مجموعه عوامل مؤثر بر کیفیت و تراکم خاک در منطقه شناسایی گردید. در این روش کفایت نمونه‌برداری و ارزیابی شایستگی داده‌ها با استفاده از ضریب KMO [7] تعیین گردید (Kaiser, 1974). بر اساس گزارش‌ها محدوده این ضریب از صفر تا ۱ است که اگر میزان آن بالاتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها جهت تجزیه عاملی مناسب است (Hair et al., 2006). معناداری اطلاعات در ماتریس همبستگی داده‌ها با استفاده از آزمون کرویت بارتلت (Bartlett, 1954) بررسی شد. در این آزمون اعداد با معنی‌داری بیشتر از ۹۵ درصد برای روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مناسب گزارش شده‌اند (Pallant, 2005). برای انتخاب تعداد مؤلفه‌های مؤثر در بررسی کیفیت فیزیکی خاک، مؤلفه‌هایی انتخاب شدند که مقدار ارزش ویژه[8] آن‌ها بیش‌تر از ۱ بود. مؤلفه‌هایی با مقدار ویژه بیش‌تر از ۱ تغییرات کلی در اطلاعات را بهتر از ویژگی‌های خاک به صورت فردی توصیف می‌کند (Sharma, 1996). چرخش مؤلفه‌ها از طریق واریماکس[9] برای تغییر بهینه آن‌ها انجام شد. میزان رابطه بین عامل (متغیر پنهان) و متغیر قابل مشاهده از طریق بار عاملی نشان داده می‌شود. مجذور بار عاملی نشان‌دهنده میزان تأثیر عامل در واریانس یک ویژگی است. مقادیر بار عاملی بین صفر تا ۱ متغیر است. اگر این مقدار کم‌تر از ۰/۳ باشد رابطه ضعیف و از آن چشم‌پوشی می‌شود. مقادیر بین ۰/۳ تا ۰/۶ قابل قبول و مقادیر بالاتر از ۰/۶ بسیار مطلوب خواهد بود (Kline, 2005). شاخص کیفیت تجمعی (IQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) در دو مجموعه کل داده‌ها (TDS) و مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) محاسبه گردید. در محاسبه شاخص کیفیت تجمعی، با استفاده از توابع امتیازدهی استاندارد[10]، برای هر مشخصه یک امتیاز تعیین شد (Doran and Parkin, 1994):

$$IQI = \sum_{i=1}^{n} = Wi \times Ni$$

رابطه (۱)

که در آن W_i، وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، Ni، امتیاز تعلق یافته به هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی است. از سویی شاخص کیفیت نمورو بر اساس میانگین و حداقل امتیاز ویژگی‌ها محاسبه می‌شود (Qin and Zhao, 2000):

$$NQI = \frac{n-1}{n} \sqrt{\frac{Pave^2 + Pmin^2}{2}}$$

رابطه (۲)

که در آن P_{ave}، میانگین امتیاز تعلق یافته به ویژگی های انتخاب شده در هر نمونه خاک، P_{min}، حداقل امتیاز موجود در بین ویژگی های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی است. در ادامه همبستگی شاخص‌های کیفیت خاک در دو مجموعه کل و حداقل داده‌ها به روش پیرسون بررسی شد. سپس تحلیل زمین‌آماری شامل واریوگرافی و کریجینگ برای میان‌یابی و دست‌یابی به نقشه ویژگی‌ها و کیفیت خاک در سطح منطقه انجام شد. در ادامه وضعیت کیفیت و تراکم و خاک در منطقه جهت اقدامات حفاظتی و مدیریتی آتی بررسی گردید.

نتایج و بحث

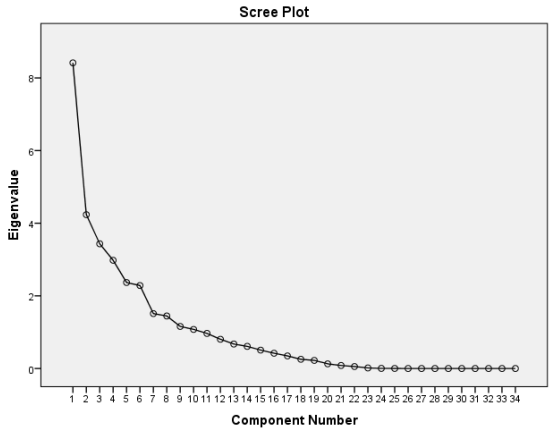
بر اساس نتایج آزمایشگاهی و آنالیز آماری، در هر دو لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین، سیلت جز غالب ذرات خاک در منطقه بود. نتایج حاکی از وجود مقادیر بالای کربنات کلسیم و آهکی بودن خاک منطقه و مقادیر کم تا برخی نقاط متوسط ماده آلی در خاک منطقه بود. با توجه به مقادیر سدیم، SAR و رسانش الکتریکی در بررسی آماری و از سویی بررسی پهاش

خاک (میانگین برابر ۸) در مطالعات گذشته این منطقه (Kianian and Shekaari, 2018)، نشانه‌ای از شوری یا سدیمی بودن خاک منطقه وجود نداشت. نتایج همبستگی پیرسون در لایه سطحی خاک نشان داد که کربن آلی خاک با میانگین وزنی قطر خاکدانه در الک تر و ذرات بین ۴-۲ میلی‌متر در الک تر در سطح احتمال ۱ درصد همبستگی دارند. میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک خشک و تر با جز رس خاک در قرائت‌های مختلف به‌ترتیب در سطح ۱ و ۵ درصد همبستگی مثبتی را نشان دادند. در لایه فشرده زیرین، رابطه جرم مخصوص ظاهری با عمق لایه فشرده زیرین، هدایت هیدرولیک خاک، تخلخل و زمان اشباع شدن نمونه‌ها از آب به‌ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۳۹-، ۰/۳۵-، ۰/۶۷- و ۰/۴۴ در سطح احتمال ۱ درصد، معنی‌دار شد. بسیاری از پژوهشگران (Edling and Fergedal, 1972; Petelkau, 1984) وضعیت متفاوت تخلخل، جرم مخصوص ظاهری و در ادامه تراکم خاک را متأثر از محتوای مواد آلی و بافت خاک دانستند. پیش از اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی مناسب بودن اطلاعات برای تحلیل بررسی گردید (جدول ۱). نتایج نشان داد که این روش می‌تواند برای کاهش داده‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه جهت بررسی کیفیت فیزیکی خاک مفید واقع شود.

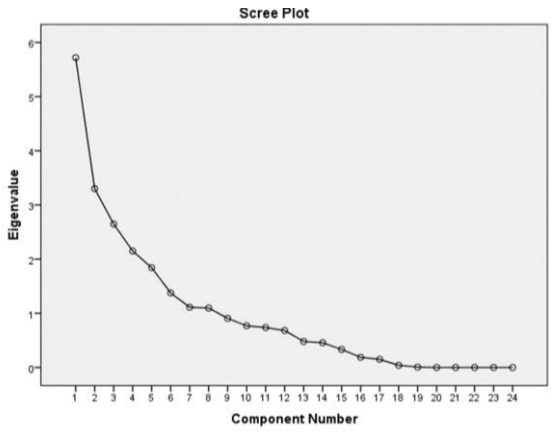
جدول ۱. مقادیر ضریب KMO و آزمون بارتلت برای تحلیل مؤلفه اصلی در لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین

	ضریب KMO	آماره بارتلت		
		مربع کای	معنی داری	درجه آزادی
لایه سطحی خاک	۰/۷۶	۱۰۷۸/۲	۰/۰۰	۱۱۸
لایه فشرده زیرین	۰/۷۲	۱۱۲۱/۶	۰/۰۰	۱۳۰

با توجه به جدول ۲ در لایه سطحی خاک تعداد ۱۰ مؤلفه اصلی توانسته‌اند ۸۵/۰۲ درصد از کل واریانس را برآورد کنند. در لایه فشرده زیرین نیز تعداد ۸ مؤلفه اصلی ۸۰/۱۸ درصد از کل واریانس را توجیه کردند. تعداد بالای مؤلفه‌های حاصل از روش PCA نشان از تغییرپذیری بسیار پیوسته‌ی ویژگی‌های خاک در منطقه بود. به نظر می‌رسد این پیوستگی می‌تواند از یک سو به دلیل تمایز نه چندان چشمگیر ویژگی‌های خاک به دلیل مواد مادری شدیداً آهکی و اقلیم نیمه‌خشک متمایل به خشک و از سوی دیگر ناشی از کشاورزی فشرده و پیوسته در منطقه مطالعاتی باشد. در این وضعیت خاک مدام در حال به‌هم‌خوردگی ناشی از کار با ادوات کشاورزی است و لایه سطحی خاک میل به یک‌دست شدن دارد که در نتیجه‌ی آن اثر متغیرهایی که می‌تواند بر تغییرات مکانی ویژگی‌ها مؤثر باشد، کم می‌شود. به‌نظر می‌رسد پیوستگی ناشی از کانی‌شناسی یکسان منطقه (بر اساس گزارش زمین‌شناسی استان، ۱۹۹۹) نیز تا حدودی توانسته است بر تغییرات تدریجی و یک‌دست شدن ویژگی‌های خاک مؤثر واقع شود. از سویی با رسم مقادیر ویژه هر مؤلفه (PC) به تعداد مؤلفه‌ها، نمودار اسکری (شکل ۳ و ۴) به‌دست آمده است که از محل شکستگی (Inflection point) می‌توان تعداد مؤلفه‌های اصلی لازم را به‌دست آورد.



شکل ۳. نمودار اسکری جهت تعیین تعداد مناسب مؤلفه‌های اصلی در روش PCA در لایه سطحی خاک



شکل ۴. نمودار اسکری جهت تعیین تعداد مناسب مؤلفه‌های اصلی در روش PCA درلایه فشرده زیرین

خلاصه ضرایب مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از چرخش واریماکس در لایه سطحی خاک و هم‌چنین لایه فشرده زیرین در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۲. مقدار ویژه، سهم هر مؤلفه و واریانس تجمعی با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی در لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین

	مؤلفه	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
لایه سطحی Surface layer	ارزش ویژه	۸/۴۱	۴/۲۳	۳/۴۳	۲/۹۷	۲/۳۶	۲/۲۸	۱/۵۱	۱/۴۴	۱/۱۵	۱/۰۷
	واریانس (٪)	۲۴/۷۵	۱۲/۴۵	۱۰/۰۹	۸/۷۶	۶/۹۶	۶/۷۱	۴/۴۴	۴/۲۵	۳/۴۰	۳/۱۶
	واریانس تجمعی (٪)	۲۴/۷۵	۳۷/۲۱	۴۷/۳۰	۵۶/۰۷	۶۳/۰۳	۶۹/۷۵	۷۴/۲۰	۷۸/۴۵	۸۱/۸۶	۸۵/۰۲
لایه فشرده زیرین	ارزش ویژه	۵/۷۱	۳/۳۰	۲/۶۴	۲/۱۴	۱/۸۴	۱/۳۷	۱/۱۱	۱/۰۹		
	واریانس (٪)	۲۳/۸۲	۱۳/۷۵	۱۱/۰۳	۸/۹۵	۷/۶۷	۵/۷۳	۴/۶۳	۴/۵۷		
	واریانس تجمعی (٪)	۲۳/۸۲	۳۷/۵۸	۴۸/۶۱	۵۷/۵۷	۶۵/۲۴	۷۰/۹۸	۷۵/۶۱	۸۰/۱۸		

جدول ۳. خلاصه ضرایب مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از روش چرخش واریماکس برای ویژگی‌های مطالعاتی در لایه سطحی خاک

	مؤلفه				
ویژگی	۱	۲	۳	۴	۵
GMD.Dry	۰/۹۲۹				
MWD.Dry	۰/۹۲۰				
<0/038mm.Dry					
0/25-0/038mm.Dry	-۰/۸۷۹				
0/5-0/25mm.Dry	-۰/۸۰۰				
2-0/5mm.Dry	۰/۷۹۰				
4-2mm.Dry	۰/۷۸۷	۰/۳۱۰			
Clay.2h	۰/۳۱۲	۰/۹۳۲			
Clay.6h	۰/۳۱۴	۰/۹۳۰			
Clay.24h		۰/۹۱۰			
Silt.2h			۰/۹۴۸		
Silt.6h			۰/۹۸۰		
Silt.24h			۰/۹۶۰		
Sand		-۰/۶۷۶	-۰/۶۷۹		
GMD.Wet				۰/۹۶۷	
MWD.Wet				۰/۶۲۹	۰/۴۶۹
<0/038mm.Wet	۰/۳۲۵			-۰/۷۳۱	
0/25-0/038mm.Wet				-۰/۸۲۵	
1-0/25mm.Wet				۰/۶۶۵	-۰/۳۲۲
2-1mm.Wet					
4-2mm.Wet					۰/۵۹۲
% OC					۰/۹۱۵
% OM					۰/۹۱۵
CEC		۰/۸۷۳			۰/۳۱۵
SAR					
EC					۰/۶۱۲
Ex Mg					
Ex Ca					
Ex K					
Ex Na					
% CaCO3					
% Slope			-۰/۳۳۲		
Plow Depth					
Satu.Percentage		۰/۳۳۹	-۰/۳۱۵		۰/۴۰۴

جدول ۴. خلاصه ضرایب مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از روش چرخش واریماکس برای ویژگی‌های مطالعاتی در لایه فشرده زیرین

ویژگی	مؤلفه			
	۱	۲	۳	۴
Clay.2h	۰/۹۶۶			
Clay.6h	۰/۹۲۴			
Clay.24h	۰/۸۸۷	-۰/۳۱۳		
Silt.2h	-۰/۳۷۲	۰/۸۸۸		
Silt.6h		۰/۹۵۹		
Silt24h		۰/۹۶۱		
Sand	-۰/۷۲۲	-۰/۶۷۴		
CEC	۰/۹۳۷			
SAR				
EC			۰/۳۶۰	۰/۴۰۹
% CaCO3				
Porosity			-۰/۸۳۲	
Bulk Density			۰/۸۳۸	
Hyd. Conductivity			-۰/۳۳۶	
Satu.Percentage				
Ex Mg				
Ex Ca				
Ex K				
Ex Na				
% Slope	-۰/۳۳۸		-۰/۳۸۲	
Plow Depth			-۰/۵۰۴	
Satu.time			۰/۶۵۹	
% OC				۰/۹۶۴
% OM				۰/۹۶۴

تحلیل مؤلفه اصلی در لایه سطحی خاک نشان داد که مؤلفه اول (PC1) با ارزش ویژه ۸/۴۱ به میزان ۲۴/۷۵ درصد از کل واریانس را برآورد می‌کند و دارای بیش‌ترین بار عاملی مثبت با GMD در الک خشک و MWD در الک خشک و بیش‌ترین بار عاملی منفی با ذرات بین ۰/۰۳۸-۰/۲۵ میلی‌متر در الک خشک است. بیش‌ترین بار عاملی مؤلفه دوم و سوم به‌ترتیب مربوط به قرائت‌های رس و سیلت بود. مؤلفه اول در لایه فشرده زیرین دارای بیش‌ترین بار عاملی مثبت و منفی با درصد رس ۲ ساعت و درصد شن است. تشریح مؤلفه دوم این لایه توسط ذرات سیلت صورت گرفت. مؤلفه سوم نیز دارای بیش‌ترین بار عاملی مثبت و منفی به‌ترتیب با جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک بود.

برای تعیین ویژگی‌های MDS در هر مؤلفه اصلی فقط متغیرهایی که در محدوده ده درصد قدرمطلق متغیر با بالاترین بار عاملی قرار داشتند، انتخاب شدند (Andrews et al., 2004). سهم (COM)[11] و وزن ویژگی‌های مورد مطالعه برای محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک در مجموعه MDS برای لایه سطحی خاک و هم‌چنین لایه فشرده زیرین در جدول ۵ ارائه شده است. وزن مربوط به هر ویژگی از نسبت سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها محاسبه شده است.

نتایج حاصل از آزمون همبستگی به روش پیرسون (جدول ۶) همبستگی نسبتاً بالای هر دو شاخص کیفیت خاک در دو مجموعه کل و حداقل داده‌ها در سطح خاک و لایه فشرده زیرین را با اطمینان ۹۹ درصد نشان داد. طی ارزیابی کمی و بررسی پراکنش شاخص کیفیت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک غرب ایران به روش PCA تعداد ۱۶ ویژگی به عنوان مجموعه کل داده‌ها بررسی شد که از این میان ۸ ویژگی به عنوان مجموعه حداقل داده‌ها انتخاب شد. نتایج حاکی از آن بود که با اطمینان ۰/۷۹ در مدل IQI و ۰/۹۴ در مدل NQI می‌توان از MDS به‌جای TDS استفاده کرد (Nori et al., 2019). طی ارزیابی کیفیت خاک در گندم‌زارهای منطقه پیرانشهر به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت خاک با استفاده از تکنیک میان‌یابی، متناسب با رشد گیاه به ۵ کلاس طبقه‌بندی شد. در این مطالعه که کربن آلی، رس، نسبت جذب سدیم، کربنات‌کلسیم معادل و سیلت به‌عنوان مجموعه حداقل انتخاب شدند، IQI.TDS نسبت به IQI.MDS به علت ضریب اطمینان بیش‌تر از دقت بالاتری برای پیش‌بینی

عملکرد اجزای گندم برخوردار بود. اما به علت همبستگی مثبت و معنی‌دار مابین آن‌دو IQI.MDS (R^2=0.9) نیز مدل مناسبی گزارش شد (Kafe et al., 2024). باید در نظر داشت در روش استفاده از حداقل داده‌ها هر چند که اطلاعات کافی جهت تعیین کیفیت خاک در دسترس قرار می‌گیرد، اما ممکن است با کاهش متغیرهای مؤثر دقت ارزیابی کیفیت خاک نیز کاهش یابد. گزارش برخی از پژوهشگران در حوزه مطالعه کیفیت خاک نیز با این نتیجه‌گیری همسو است (Shakouri-Katigari et al., 2020). با توجه به جدول ۶ می‌توان از مجموعه MDS به جای TDS جهت بررسی وضعیت کیفیت خاک تا حد اطمینان نسبتاً قابل قبولی به ویژه در لایه سطحی خاک بهره برد. اما به نظر می‌رسد مجموعه حداقل در لایه فشرده زیرین نتوانسته است نماینده خیلی مناسبی از مجموعه کل داده‌ها باشد. این مسأله ممکن است به دلیل تخریب بیش از حد ساختمان خاک در نتیجه تراکم و یکدست بودن وضعیت لایه فشرده زیرین باشد که باعث می‌شود تأثیر ویژگی‌های انتخابی بر کیفیت خاک کمرنگ شده و نیازمند در نظر گرفتن حداکثر ویژگی‌ها جهت بررسی دقیق‌تر کیفیت خاک در لایه فشرده زیرین است. در ادامه به بررسی تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک پرداخته شده است.

جدول ۶. نتایج آزمون همبستگی شاخص‌های کیفیت خاک در لایه سطحی و لایه فشرده زیرین

	IQI.TDS.SL	NQI.TDS.SL	IQI.TDS.BP	NQI.TDS.BP
IQI.MDS.SL	۰/۷۶**			
NQI.MDS.SL		۰/۷۲**		
IQI.MDS.BP			۰/۶۱**	
NQI.MDS.BP				۰/۵۸**

** معنی دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

SL: لایه سطحی خاک، BP: لایه فشرده زیرین

واریوگرام شاخص‌های کیفیت خاک در شکل ۵ و ۶، هم‌چنین پارامترهای مدل زمین‌آماری شاخص‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. نظر به وابستگی مکانی ذاتی دو شاخص NQI و IQI و به منظور دست‌یابی به دید کلی درباره توزیع این دو شاخص کیفیت در منطقه مطالعاتی نتیجه واریوگرافی هر دو شاخص در هر دو مجموعه حداقل و کل داده‌ها در دو لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین قوی بود (جدول ۷). دامنه تأثیر نسبتاً بالا در شاخص‌های کیفیت خاک نشان داد که تغییرات آن‌ها در فواصل بزرگ رخ داده است که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ذاتی، یکنواخت بودن مواد مادری و تغییرات تدریجی باشد.

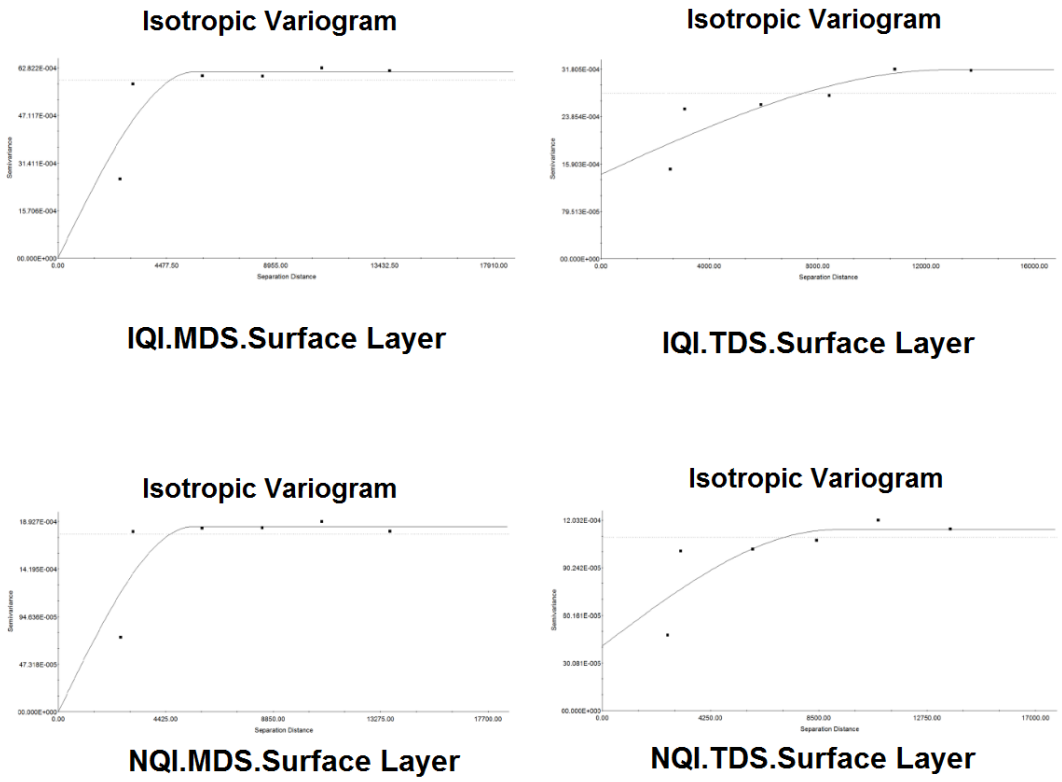
جدول ۵. وزن ویژگی‌های مورد مطالعه در مجموعه حداقل داده‌ها در لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین با استفاده از تجزیه عاملی

ویژگی در لایه سطحی	سهم	وزن	ویژگی در لایه فشرده زیرین	سهم	وزن
میانگین وزنی قطر خاکدانه الک خشک	۰/۹۷۵	۰/۱۰۵	درصد رس ۶ ساعت	۰/۹۶۷	۰/۱۲۷
ذرات ۰/۰۳۸-۰/۲۵ میلی‌متر الک خشک	۰/۸۷۵	۰/۰۹۴	جرم مخصوص ظاهری	۰/۷۶۱	۰/۱۰۰
درصد کربن آلی	۰/۸۶۹	۰/۰۹۴	درصد کربن آلی	۰/۹۵۰	۰/۱۲۵
درصد رس ۲ ساعت	۰/۹۸۰	۰/۱۰۶	منیزیم تبادلی	۰/۸۰۶	۰/۱۰۶
منیزیم تبادلی	۰/۷۳۲	۰/۰۷۹	کلسیم تبادلی	۰/۵۶۳	۰/۰۷۴
کلسیم تبادلی	۰/۶۷۹	۰/۰۷۳	کربنات کلسیم	۰/۷۸۳	۰/۱۰۳
درصد سیلت ۶ ساعت	۰/۹۷۴	۰/۱۰۵	درصد تخلخل	۰/۷۹۳	۰/۱۰۴
سدیم تبادلی	۰/۹۴۹	۰/۱۰۲	نسبت جذب سدیم	۰/۹۸۸	۰/۱۳۰
کربنات کلسیم	۰/۷۵۵	۰/۰۸۱	درصد سیلت ۶ ساعت	۰/۹۷۶	۰/۱۲۸
میانگین هندسی قطر خاکدانه الک تر	۰/۹۷۷	۰/۱۰۵			
عمق لایه فشرده زیرین	۰/۴۷۶	۰/۰۵۱			

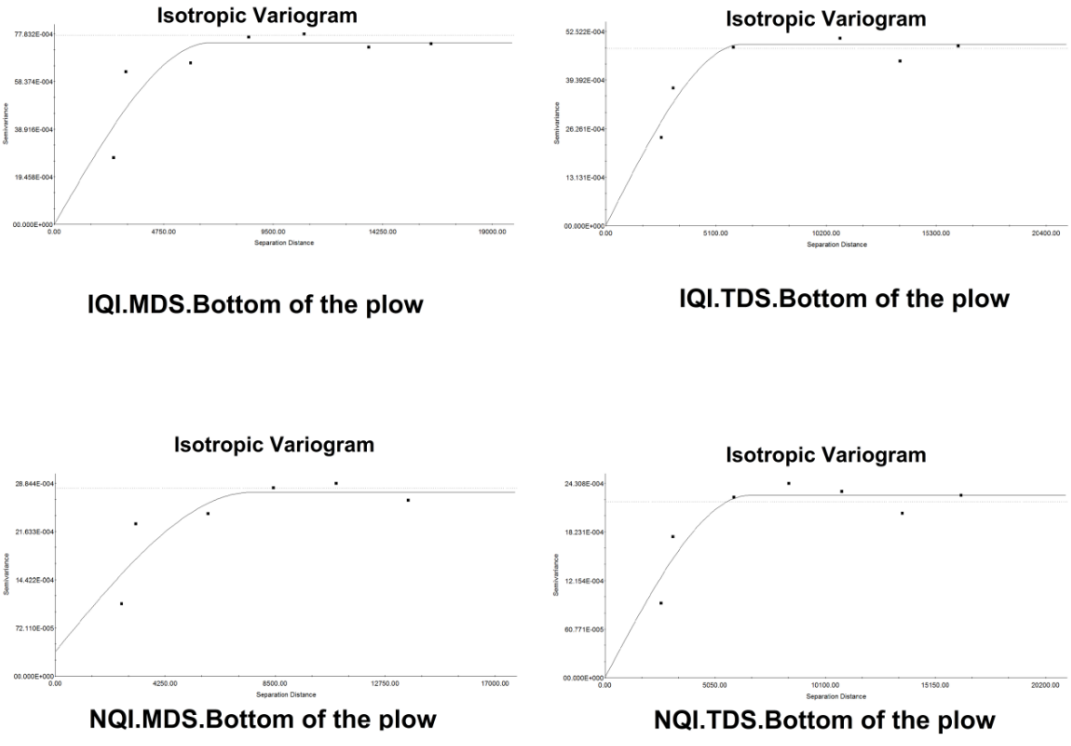
جدول ۷. پارامترهای مدل زمین‌آماری برازش داده شده بر شاخص‌های کیفیت خاک

متغیر	مدل	ضریب تبیین	ناگت	آستانه	دامنه تأثیر	RSS	وابستگی مکانی	
							درصد	کلاس
IQI. TDS.SL	کروی	۰/۷۶	۰	۰	۱۲۸۲۰	۰	۰	قوی
IQI. MDS.SL	کروی	۰/۶۹	۰	۰	۵۶۲۰	۰	۰	قوی
IQI.TDS.BP	کروی	۰/۸۸	۰	۰	۶۳۵۰	۰	۰	قوی
IQI.MDS.BP	کروی	۰/۷۵	۰	۰	۶۸۱۰	۰	۰	قوی
NQI.TDS.SL	کروی	۰/۶۵	۰	۰	۹۱۳۰	۰	۰	قوی
NQI.MDS.SL	کروی	۰/۶۴	۰	۰	۵۵۵۰	۰	۰	قوی
NQI.TDS.BP	کروی	۰/۸۴	۰	۰	۶۶۴۰	۰	۰	قوی
NQI.MDS.BP	کروی	۰/۷۵	۰	۰	۷۶۲۰	۰	۰	قوی

SL: لایه سطحی خاک، BP: لایه فشرده زیرین



شکل ۵. نیم‌تغییرنمای برازش داده شده بر شاخص‌های IQI و NQI در دو مجموعه TDS و MDS در لایه سطحی خاک



شکل ۶. نیم‌تغییرنمای برازش داده شده بر شاخص‌های IQI و NQI در دو مجموعه TDS و MDS در لایه فشرده زیرین

با توجه به جدول ۷، بر کلیه شاخص‌های به‌دست آمده، مدل کروی برازش داده شد. مقادیر بالای ضریب تبیین و مقادیر پایین RSS مناسب بودن مدل برازش‌داده شده را تایید می‌کند. RSS نشان‌دهنده انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی است و هر اندازه کوچک‌تر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار است. ضریب تبیین نیز شاخصی از تشریح تغییرات متغیر وابسته به‌وسیله متغیر مستقل است و هر اندازه به ۱ نزدیک‌تر باشد برازش مدل مناسب‌تر است. شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه ساختار مکانی قوی نشان دادند که می‌تواند ناشی از عوامل ذاتی مثل بافت و کانی‌شناسی رس باشد (Cambardella et al., 1994). در ادامه نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه مطالعاتی به روش کریجینگ معمولی در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل از همبستگی ویژگی‌ها و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، نقشه توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های مرتبط با کیفیت خاک جهت بررسی ارتباط نحوه توزیع آن با کیفیت خاک در سطح منطقه در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

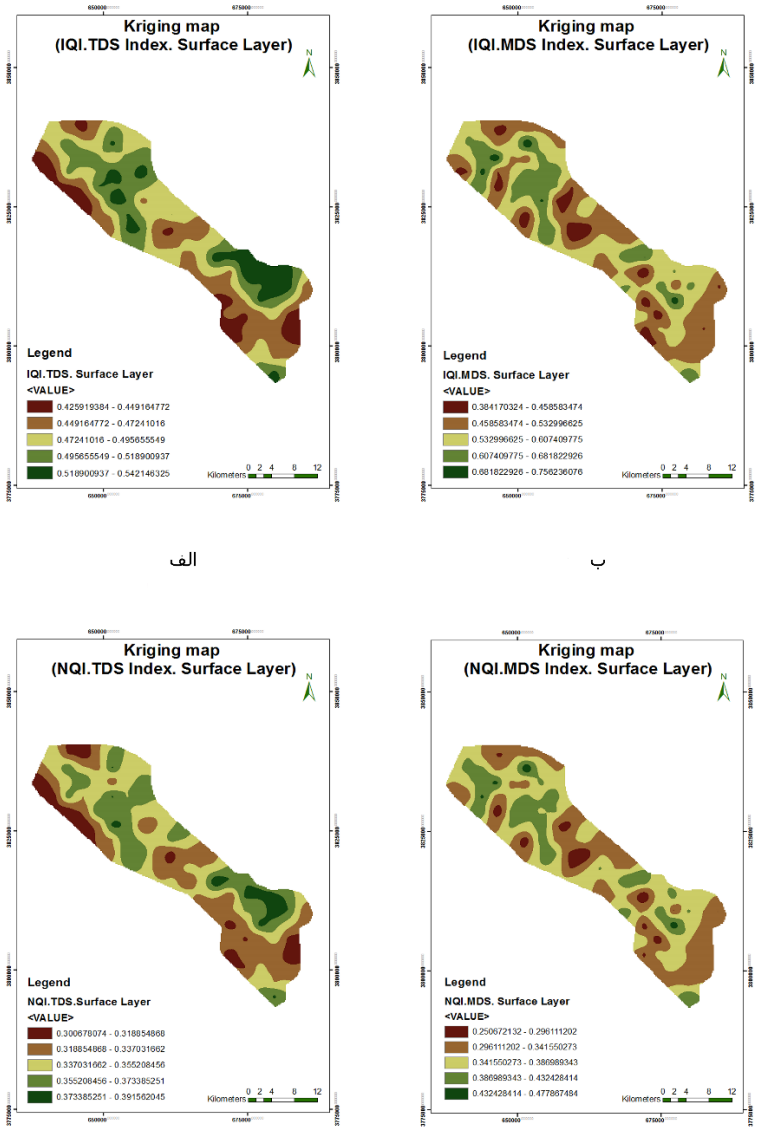
با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت در مجموعه TDS قسمت‌های شمال تا شمال‌غرب و هم‌چنین شمال‌شرق منطقه دارای خاک با کیفیت بالاتر است. اما در نقشه پهنه‌بندی مجموعه MDS فقط قسمت‌های شمال تا شمال‌غرب منطقه دارای خاک با کیفیت نسبتاً بالاست. این مسأله نشان می‌دهد که در مجموعه MDS، تعداد کم‌تر ویژگی‌ها نتوانسته است تخمین دقیقی از قسمت‌های شمال‌شرقی منطقه را داشته باشد. پژوهشگران اذعان داشتند در مجموعه MDS به‌دلیل در نظر نگرفتن بخشی از تغییرات داده‌ها، حساسیت مدل کاهش یافته اما از نظر صرفه اقتصادی و زمانی پرکاربرد (Shahab Arkhazloo and Emami, 2012) و اثر تکرارپذیری حاصل از ویژگی‌های با همبستگی مشابه را کاهش می‌دهد (Nori et al., 2019; Pieri, 1992).

بر اساس طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو (Qi et al., 2009) هر اندازه مقدار شاخص‌ها کم‌تر شود، محدودیت رشد گیاه بیش‌تر می‌شود. به‌نظر می‌رسد کاهش کیفیت در برخی مناطق به‌دلیل عملیات خاکورزی سنتی توسط کشاورزان در این قسمت‌ها (بر اساس مصاحبه حضوری) و در پی آن متراکم شدن خاک به‌وجود آمده است. بر اساس مطالعات، خاکورزی هم می‌تواند باعث نرم شدن خاک و هم فشردگی آن شود که بسته به مقدار آب خاک، نوع خاک (بافت) و نوع عملیات خاکورزی متفاوت است (Voorhees, 1983). از سویی با توجه به قرارگیری اراضی فاریاب در قسمت‌های با محدودیت شدید در شکل ۷ می‌توان گفت عملیات کشتوکار فشرده در این زمین‌ها باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری، تجزیه ماده آلی و ایجاد محدودیت بیشتر شده است که با نتایج حاصل از مطالعه پژوهشگران (Bahrami et al., 2010) مطابقت دارد.

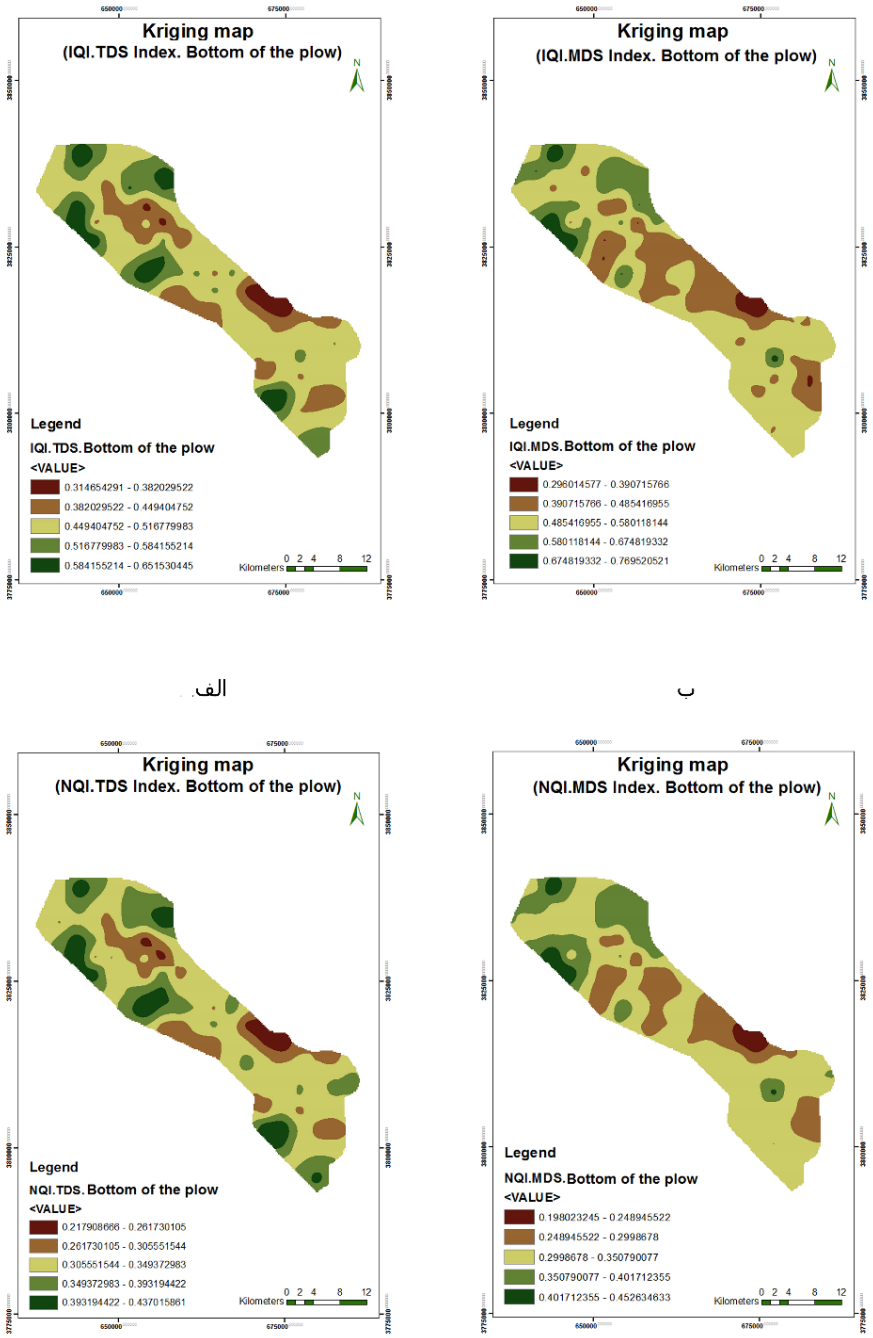
با توجه به شکل ۸ می‌توان اذعان داشت که اراضی مرکزی منطقه مطالعاتی کیفیت پایین خاک را در هر دو شاخص و هر دو مجموعه حداقل و کل داده‌ها در لایه فشرده زیرین نشان دادند که می‌تواند به دلیل موارد ذکر شده در لایه سطحی خاک باشد. از سویی قسمت‌های جنوب، جنوب‌شرق، قسمت‌هایی از شمال تا شمال‌غرب در لایه فشرده زیرین برخلاف لایه سطحی خاک محدودیت بالایی نشان نداد. دلیل دیگر رفع محدودیت در این قسمت‌ها می‌تواند ناشی از هوادیدگی کم‌تر لایه‌های زیرین و کاهش هدر رفت ماده آلی خاک به‌دنبال کشت دیم و کم‌خاک‌ورزی باشد که منجربه باقی ماندن اندازه ذرات در حد شن شده و فشردگی کم ترخاک را به‌همراه داشته است. مطالعات نشان داده است که در اراضی زراعی تحت تأثیر عملیات آبیاری که طی دوره‌هایی از سال دارای چرخه خشک و مرطوب شدن هستند، این فرآیند می‌تواند باعث هوادیدگی کانی‌های اولیه شود که نتیجه آن کاهش اندازه ذرات، افزایش درصد رس و سیلت شود (Presley et al., 2004) که به‌دنبال آن افزایش فشردگی خاک و جرم مخصوص ظاهری در اثر کاهش منافذ ماکرو اتفاق می‌افتد. از سویی وجود پوشش گیاهی بکر و دست‌نخورده مراتع در این نواحی از طریق وجود ریشه‌های چند ساله و افزایش تهویه خاک موجب نگهداشت تخلخل تهویه ای و عدم فشردگی خاک می‌شود. با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت مجموعه کل داده‌ها در لایه فشرده زیرین برآورد دقیق‌تری از کیفیت خاک منطقه داشته و جزئیات بیش‌تری را نمایان کرده است. طی بررسی کیفیت خاک ۱۷۰۰۰ هکتار از اراضی کشت چای در جنوب‌شرق ترکیه با ۲۸ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۲۰ سانتی‌متر)، شاخص کیفیت تجمعی وزنی با استفاده از کل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده (۲۲ ویژگی) به‌دست آمد. در این مطالعه ۲۵ درصد نمونه‌ها از کیفیت پایین و ۷۵ درصد نمونه‌ها از کیفیت متوسط برای کشت چای برخوردار بودند و مجموع کل ویژگی‌ها توانست برآورد مناسبی از کیفیت خاک منطقه داشته باشد (Dengiz et al., 2020).

در مجموعه حداقل داده، تعداد ویژگی های مؤثر در ارزیابی کیفیت خاک به حداقل می‌رسد. اما می‌بایست شاخص‌های جامعه خاک مطالعه‌شده را به‌درستی منعکس کند (Chandel et al., 2018). از این‌رو کاهش دقت مجموعه حداقل داده را می‌توان به حساسیت انتخاب ویژگی‌های مؤثر در برآورد شاخص نسبت داد. طی بررسی کیفیت خاک در اتیوپی (Mesfin et al., 2022)، درصد سیلت، واکنش خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، فسفر در دسترس به عنوان مجموعه حداقل و در چین، کربن آلی، پتاسیم قابل دسترس، روی، منیزیم، پتاسیم کل و رس به عنوان MDS در نظر گرفته شدند. پس با توجه به شرایط مختلف ذاتی و مدیریتی، مجموعه حداقل داده‌ها متفاوت انتخاب می‌شود.

با توجه به شکل ۹ افزایش کیفیت خاک در نواحی با مقادیر رس بالا در لایه سطحی خاک می‌تواند به‌دلیل هم‌آوری رس و ماده آلی و در پی آن افزایش پایداری خاکدانه‌ها باشد. اما در لایه فشرده زیرین کشت‌وکار مداوم در منطقه به‌دلیل مقادیر کم کربن آلی و مقادیر بالای رس صرفاً باعث تراکم هرچه بیش‌تر خاک شده است. با توجه به شکل ۷ افزایش تراکم و کاهش کیفیت خاک به صورت لکه‌هایی در مناطق شمال‌غرب و شمال‌شرق را می‌توان به بافت سنگین خاک نسبت داد. اما به صورت کلی نحوه پراکنش رس در لایه سطحی خاک با شاخص‌های کیفیت خاک همسو بود. احتمالاً وجود تخلخل ریز باقی‌مانده در بافت رسی این مناطق توانسته تا مقادیر چشم‌گیری از تراکم بیش‌تر خاک و افزایش جرم مخصوص ظاهری جلوگیری کند. مواد آلی هرچند در مقادیر کم موجود در لایه سطحی این نواحی (شکل ۱۰) می‌تواند در این روند مؤثر واقع شده باشد. در لایه فشرده زیرین با وجود عدم افزایش چشم‌گیر جرم مخصوص ظاهری (بر اساس نتایج آماری پژوهش حاضر و شکل ۱۰) به دلیل وجود حفرات ریز، کیفیت خاک در نواحی با مقادیر رس بالا وضعیت مناسبی نشان نداد. می‌توان اذعان داشت کاهش ماده آلی در لایه زیرین خاک، تردد مکرر ادوات کشاورزی طی سالیان متمادی و به صورت کلی عوامل مدیریتی موجبات تراکم و کاهش کیفیت خاک در این نواحی را فراهم آورده‌اند.



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو در دو مجموعه کل و حداقل داده‌ها در لایه سطحی خاک منطقه مطالعاتی (الف: IQI.TDS.SL، ب: IQI.MDS.SL، ج: NQI.TDS.SL، د: NQI.MDS.SL)



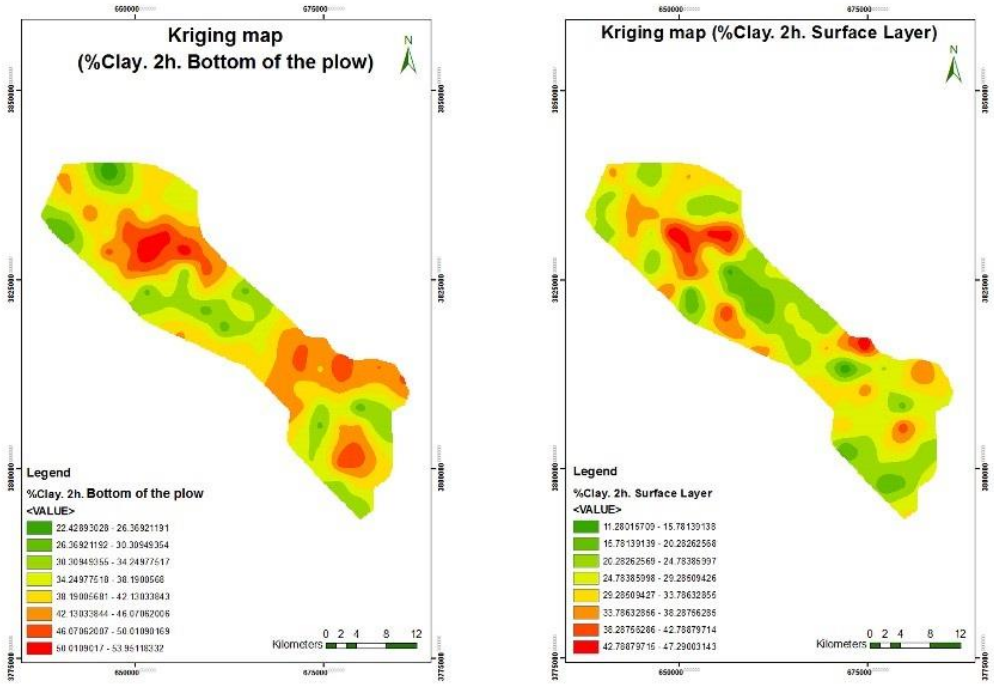
شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو در دو مجموعه کل و حداقل داده‌ها در لایه فشرده زیرین در منطقه مطالعاتی (الف: IQI.TDS.BP، ب: IQI.MDS.BP، ج: NQI.TDS.BP، د: NQI.MDS.BP)

در لایه فشرده زیرین بر خلاف لایه سطحی خاک، در قسمت‌هایی که مقادیر رس بالا بود، شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک کاهش یافت که با نتایج مشاهدات صحرائی و میزان تراکم بالای خاک در لایه فشرده زیرین این نواحی همخوانی داشت. به‌نظر می‌رسد تراکم از طریق شکستن خاکدانه‌ها و رس‌های به‌هم‌چسبیده در اندازه سیلت و شن باعث کاهش حجم حفرات درشت و افزایش جرم مخصوص ظاهری شده است. با نظر به شکل ۱۰ می‌توان گفت توزیع مکانی ماده آلی و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک در این مطالعه همسو است. یکی از دلایل کمبود ماده آلی در لایه زیرین نسبت به لایه سطحی می‌تواند عدم کوددهی در لایه زیرین خاک باشد. مقادیر کم کربن آلی در لایه سطحی خاک نیز می‌تواند به دلیل کشت‌وکار زیاد

(Eynard et al., 2004) و به‌دنبال آن شکستن خاکدانه‌ها و قرارگیری ماده آلی در معرض حمله میکروبی و تجزیه آن باشد. تغییرات کربن آلی شاخص مناسبی برای ارزیابی تأثیر عملیات مدیریتی در اراضی کشاورزی است (Pathak et al., 2004). عملیات کشت‌وکار مداوم منجربه هوادهی و تجزیه بیش‌تر ماده آلی شده و در پی آن منبع آلی کم‌تری برای فعالیت ریزجانداران و تولید زیست‌توده میکروبی فراهم است. طی مطالعه‌ای در شمال‌شرق چین بیش‌ترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در جنگل‌های طبیعی (۷۷ درصد بیش‌تر از اراضی کشاورزی) و کم‌ترین مقدار آن در اراضی تحت کشت است (Gentile et al., 2021). از سویی عدم مصرف کود آلی، حذف بقایا از طریق سوزاندن جهت کشت مجدد در همان سال که مجموعه سو مدیریت اراضی است را می‌توان دلیل دیگر کاهش این ویژگی و اثرات مخرب آن بر کیفیت خاک در منطقه دانست. بنا به گزارشات، افت کیفیت خاک نتیجه افزایش فشار به منابع زمین است که با تشدید و گسترش فعالیت‌های انسانی همراه است (De Laurentiis et al., 2019).

بیش‌ترین مقدار MWD در الک خشک مربوط به شمال تا شمال‌غرب در امتداد مرکز و قسمت‌هایی از شمال‌شرق منطقه است که با نقشه کیفیت خاک لایه سطحی (شکل ۷) همخوانی دارد. در این مناطق ماده آلی با ایجاد هم‌آوری رس توانسته است پایداری خاکدانه را افزایش دهد. به طور کلی شکسته شدن خاکدانه‌ها در اثر عملیات خاکورزی باعث کاهش حفاظت فیزیکی و تسریع در تجزیه ماده آلی شده و ناپایداری هر چه بیش‌تر خاکدانه و کاهش کیفیت خاک را در پی دارد. از سویی وجود ماده آلی در پی کوددهی می‌تواند با افزایش سطح ویژه باعث اتصال ذرات خاک، تشکیل خاکدانه‌های جدید سبب افزایش تخلخل و کاهش جرم مخصوص ظاهری شود. طی پژوهشی در بررسی میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه و همچنین درصد خاکدانه‌های پایدار در آب گزارش شد که عملیات کشت‌وزرع به طرز معناداری موجب کاهش پایداری خاکدانه به دلیل کاهش ماده آلی خاک می‌گردد (Khakipour, 2024).

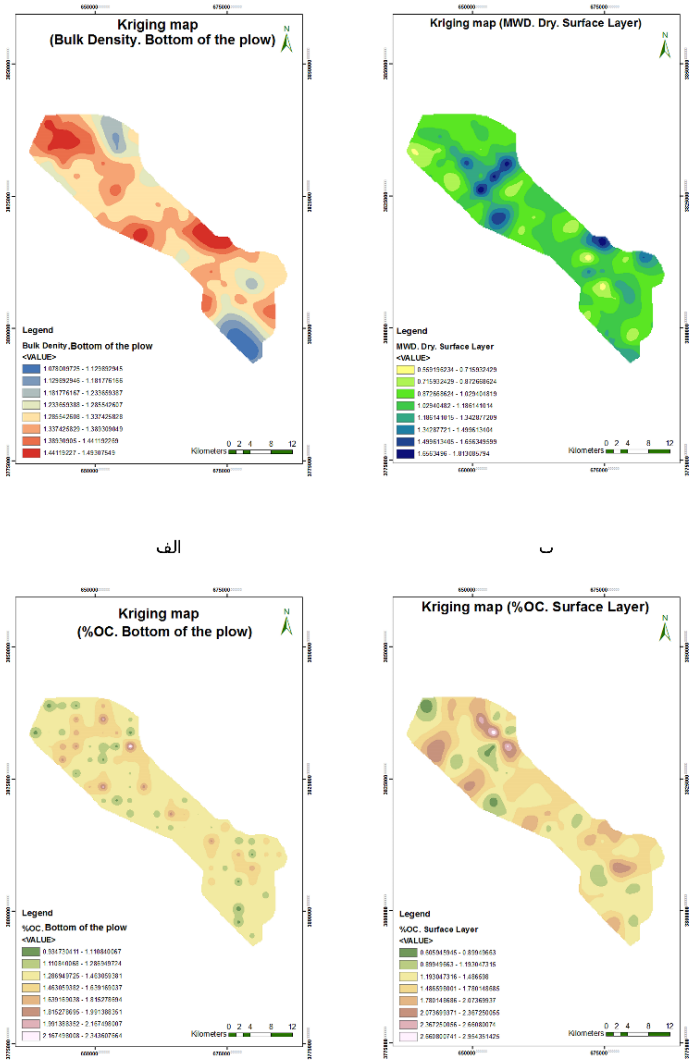
می‌توان اذعان داشت بسته به شرایط اقلیمی، وضعیت خاک و مدیریت صحیح آن (مانند استفاده از روش‌های نوین بی‌خاکورزی، کم‌خاکورزی، حفظ بقایا، کوددهی مناسب و ...) می‌توان در جهت نگهداشت ماده آلی خاک، افزایش خاکدانه‌سازی و در پی آن حفظ کیفیت خاک کوشید. بنابراین لازم است با توجه به شرایط بومی و اقلیمی هر منطقه پارامترهای مؤثر بر کیفیت خاک شناخته و بررسی شوند تا در کنار افزایش عملکرد محصول، زمینه استفاده صحیح از سرزمین فراهم شود.



الف ب

شکل ۹. نقشه توزیع مکانی مقادیر رس در لایه سطحی خاک و لایه فشرده زیرین

(الف: درصد رس ۲ ساعت در لایه سطحی خاک، ب: درصد رس ۲ ساعت در لایه فشرده زیرین)



شکل ۱۰. نقشه توزیع مکانی الف: جرم مخصوص ظاهری لایه فشرده زیرین، ب: MWD لایه سطحی، ج: درصد کربن آلی لایه فشرده زیرین، د: درصد کربن آلی لایه سطحی در منطقه مطالعاتی

نتیجه‌گیری

شاخص‌های کیفیت خاک اغلب منطقه‌ای هستند و نمی‌توان به‌طور ثابت در همه مناطق از یک مجموعه شاخص برای بررسی کیفیت خاک استفاده کرد. به‌نظر می‌رسد گستردگی تعداد متغیرهای مؤثر بر تراکم و کیفیت فیزیکی خاک در منطقه از یک‌سو و همچنین تغییرات بسیار تدریجی متغیرها از سوی دیگر باعث شده است که برآورد دقیق شاخص‌های کیفیت خاک به‌ویژه در مجموعه حداقل داده‌ها با سختی مواجه شود. می‌توان اذعان داشت که به دلیل وجود وابستگی مکانی ویژگی‌های خاک، به‌کارگیری تعداد بیش‌تر متغیرها با صرف‌نظر از وقت و هزینه بالا ، برآورد دقیق‌تر و مناسب‌تری از وضعیت کیفیت خاک منطقه به‌دست داده است.

به طور کلی عملیات کشت‌وکار فشرده در بیش‌تر قسمت‌های منطقه باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری، تراکم، تجزیه ماده آلی و کاهش کیفیت خاک شده است. نتایج نشان داد که می‌توان جهت بررسی وضعیت کیفیت خاک در منطقه مطالعاتی از مجموعه MDS به جای TDS تا حد اطمینان نسبتاً قابل قبولی به خصوص در لایه سطحی خاک استفاده کرد. بنابراین جهت برنامه‌ریزی مدیریت صحیح اراضی برای کاهش تراکم و پیشگیری رخداد آن در نواحی مستعد پیشنهاد می‌شود که ویژگی‌های تأثیرگذار بر کیفیت خاک و همچنین عوامل مدیریتی مؤثر با صرف وقت و هزینه کم از طریق روش‌های کاهش داده مورد بررسی قرار گیرند. همچنین با توجه به تأثیر مدیریت‌های مختلف بر کیفیت خاک پیشنهاد می‌گردد تغییرات زمانی کیفیت خاک به‌صورت مستمر بررسی گردد.

Reference:

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal. 68,1945–1962.

Bahrami, A., Emadodin, I., Ranjbar- Atashi, M. & Rudolf-Bork, H. (2010). Land Use Change and Soil Degradation: A Case Study, North of Iran. Agric. Biol. J. North. Amer. 1: 4. 600-605. [in persian]

Bartlett, M. S. (1954). A note on the multiplying factors for various chi square approximations. Journal of the Royal Statistical Society, 16, 296–298.

Beylich, A., Oberholzer, H. R., Schrader, S., Höper, H., & Wilke, B. M. (2010). Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. Soil and Tillage Research, 109(2),133-143.

Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. & Koropaka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in centeral Iowa soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1501-1511.

Chandel, S., Hadda, M., & Mahal, A. (2018). Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of submontane Punjab. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 49: 658-674.

De Laurentiis, V., Secchi, M., Bos, U., Horn, R., Laurent, A., & Sala, S. (2019). Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA. Journal of Cleaner Production, 215, 63-74.

De Leenheer, L., & De Boodt, M. (1959). Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Mededelingen van landbouwhoge school en de opzoeking stations van de staat te Gent 24: 290–300.

Dengiz, O., Sekan, I. C., Saygin, F., & Imamoglu, A. (2020). Assessment of Soil Quality Index for Tea Cultivated Soils in Ortaçay Micro Catchment in Black Sea Region. Journal of Agricultural Sciences, 26(1), 42-53.

Doran, J.W. & Parkin, B.T. (1994). Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek D.F., Stewart, B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA, pp. 3–21. Special Publication. No. 35.

Edling, P., & Fergedal, L., (1972). Experiments on soil compaction 1968±69. Agricultural College of Sweden, Uppsala, Division of Soil Management, Report 31, 71 pp. (in Swedish).

Eynard, A., Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J. & Malo, D. D. (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. Soil Science Society of American Journal 68: 1360-1365.

Gallaher, R. N., Weldon, C. O., & Boswell, F. C. (1976). A semiauto-mated procedure for total nitrogen in plant and soil samples. Soil Sci. Soc. Am. J. 40, 887–889.

Gentile, R. M., Malepfane, N. M., van den Dijssel, C., Arnold, N., Liu, J., & Müller, K. (2021). Comparing deep soil organic carbon stocks under kiwifruit and pasture land uses in New Zealand. Agriculture, Ecosystems and Environment, 306: 107-190.

Geological report. 1999. Geological map 1:100000 of Kermanshah province. Mineral exploration organization of the country. Ministry of Power.

Hair, J. F., Black, B., Babin, B., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2006). Multivariate data analysis (6th ed.). New Jersy: Prentice Hall.

Isong, I. A., John, K., Okon, P. B., Ogban, P. I., & Afu, S. M. (2022). Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria .Ecological Processes, 11(1), 1-22.

Kafe, F., Dalalian, M., Rezapour, S., Sabbaghtazeh, E., & Rafieyan, O. (2024). Determining the minimum data set to evaluate soil quality in Piranshahr Region wheat fields. Applied Soil Research, 11(4): 30-42.

Kaiser, H. (1974). An index of factorial simplicity. Psychometrika, 39, 31–36.

Karkaj, E. S., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J. T., & Shahbazi, F. (2019). Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 19(3), 648-658.

Khakipour, N. (2024). Impacts of land use changes on some soil quality indicators in a part of Lahijan region, Gilan Province. Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture), 47 (1): 19-34. [in persian]

Kianian, N., & Shekaari, P. (2018). Investigating the spatial changes of several surface soil chemical properties in the Sandjaabi plain of Kermanshah province. The first international conference and the third national conference on sustainable resource management Soil and environment. [in persian]

Kim, S. W., Jeong, S.W., & An, Y. J. (2020). Application of a soil quality assessment system using ecotoxicological indicators to evaluate contaminated and remediated soils. Environmental Geochemistry and Health, 42(6), 1681-1690.

Kline, R. B. 2005. Principles and practice of structural equation modeling (2th ed.). New York: Guilford.

Liu, R. X., Kuang, J., Gong, Q., & Hou, X. L. (2003). Principal component regression analysis with SPSS. Computer methods and programs in biomedicine, 71(2), 141-147.

McDonald, T. (2015). SDrawNPS: A version of the SDraw R package developed for the National Park Service. [https://github.com/tmcd82070/SDrawNPS]

Mesfin, D. Assefa, E., & Simane. B. (2022). Variability of soil quality indicators along with the different landscape positions of Choke Mountain agroecosystem, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. Heliyon, 8(7): 1-19.

Nori, N., Rostaminia, M., Keshavarzi, A. & Rahmani, A. (2019). Quantitative Evaluation and Zoning of Spatial Distribution of Soil Quality Index in Some Parts of Arid and Semi-Arid Lands of Western Iran (Case Study: Kane Sorkh Region, Ilam Province), Iranian Journal of Soil and Water Research (IJSWR) 50(7): 1701-1719. (In Persian with English abstract). [in persian]

Page, A. L., Miller, R. H., & Jeeney, D. R. (1992a). Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical properties. SSSA Pub., Madison. 1750 p.

Page, A. L., Miller, R. H., & Jeeney, D. R. (1992b). Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and mineralogical properties. SSSA Pub., Madison. 1159 p.

Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2003). Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. Soil and Tillage Research, 73, 119–129.

Pallant, J. (2005) SPSS survival manual: a step by step guide to data analysis using spss. Buckingham: Allen & unwin.
Panayiotopoulos, K., Papadopoulou, C., & Hatjiioannidou, A. (1994). Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth ofmaize seedlings. Soil Till Res, 31, 323–337.
Pankhurst, C.E., Doube, B.M., & Gupta,V.R. (1997). Biological indicators of soil health.CAB International, Walingford, UK.
Pathak, P. K., Sahrawat, L., Rego, T. J., & Wani, S. P. (2004). Measurable Biophysical Indicators for Impact Assessment: Changes in Soil Quality. In: B. Shiferaw, H. A. Freeman, S. M. Swinton (Eds.), Natural resource and management in agriculture. Methods for assessing economic and environmental impacts. ICRISAT, Patancheru, India.
Petelkau, H. (1984). Effects of harmful compaction on soil properties and crop yields and measures to reduce compaction. Tagungsber. Akad. Landwirtsch, Wiss. Berlin 227, 25±34 (in German with English summary).
Pieri C. J. M. G. 1992. Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
Presley, D. R., Ransom, M. D., Kluitenberg, G. J. & Finnell, P. R. (2004). Effect of thirty years irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas. Soil Sci. Soc. Amer. J. 68: 1916-1926.
Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma, 149(3-4), 325-334.
Qin, M. Z., & Zhao, J. (2000). Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. Acta Geogr. Sin, 55, 545–554.
R. Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0. Available: http://www.R- project.org.
Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A., & Gue´rif, J. (2001). Effect of compaction on soil porosity: consequences on hydraulic properties. Eur. J. Soil Sci. 52, 49–58.
Schnurr-Putz, S., Guggenberger, G., & Kusell, K. (2006). Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes. FEMS Microbiology Ecology, 58, 503–516.
Shahab Arkhazloo, H. & Emami, H. (2012). Quantitative evaluating the effects of land use conversion on soil quality of southern Mashhad area. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 2(2) :69-87. [in persian]
Shakouri-Katigari, M., Shabanpour, M., Davatgar, N., & Vazifeh-Doost, M. (2020). Assessment of Soil Quality in Paddy Soils with Different Yields (A Case Study: Kouchsfahan, Guilan Province). Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(12), PP 317. [in persian]
Sharma, S. (1996). Applied multivariable techniques. New York : John Wiley and Sons.
Sojka, R. E., & Upchurch, D. R. (1999). Reser-vations regarding the soil quality concept. Soil Sci. Soc. Am. J, 63,1039–1054.
Voorhees, W. (1983). Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. Soil Science Society of America Journal, 47(1), 129-133.
Yao, R. J., Yang, J. S., Zhao, X. F., Li, X. M., & Liu, M. X. (2013). Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. Soil and Tillage Research, 128, 137–148.
Zhou, M., Xiao, Y., Li, Y., Zhang, X., Wang, G., Jin, J., Ding, G., & Liu, X.(2022). Soil quality index evaluation model in responses to six-year fertilization practices in Mollisols. Archives of Agronomy and Soil Science, 68(2): 180-194.

یادداشت‌ها

[1] Integrated quality index
[2] Nemoro quality index
[3] Minimum Data Set
[4] Principal Component Analysis
[5] Sciences Statistical Package for the Social
[6] Pearson
[7] Kaiser-Mayer-Olkin
[8] Eigen value
[9] Varimax
[10] Standard Scoring Functions
[11] Communality
[12] Factor Analysis