

Assessment and modeling of soil quality using multivariate analysis approach (Case study of rainfed agricultural land in Dezpart city)

S. Bigdeli¹, H. Ghafari^{2*}, M. Norouzi Masir³ and A. Moezzi⁴

1. Former MSc.student, Department of Soil Sciences , Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. Assistant professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
4. Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 11 November 2024 Accepted: 30 December 2024 *Corresponding Author: h.ghafari@scu.ac.ir

Abstract

Introduction: Today, the concept of soil quality (SQ) has been widely used to know the capacity and limitations of soils in different environmental systems. The degree of land suitability is determined by its capacity to provide services and its flexibility against external conditions. The production of plant biomass is one of the most important functions of soil in relation to food security. The share of dry land in Iran's agricultural production, especially wheat, is very significant. In terms of area, about half of the total agricultural lands, and in terms of production volume, about 10% of all agricultural products and about 30% of the country's wheat production, are related to these lands. Therefore, maintaining the soil quality of these lands is very important. The main goal of this research is to model and quantify the soil quality of part of the rainfed agricultural lands of Dezpart city using integrated multivariate analysis and also to determine the minimum effective data set.

Materials and methods: This study was carried out in a part of the rainfed agricultural area of Dezpart County. A total of 119 soil samples were collected using the composite method from a soil depth of 0-30 cm. Soil sampling was conducted in a stratified random manner to include all the different geomorphological units. The geographic locations of the sampling points were also recorded. The samples were then transferred to the laboratory and their chemical-fertility and physical characteristics include reaction (pH), electrical conductivity (EC), organic matter (OM), total nitrogen, available potassium, absorbable phosphorus, calcium carbonate equivalent (CCE), texture, bulk density, mean weight diameter (MWD) of soil aggregates, soil gravel content and cation exchange capacity (CEC) were measured. Then the soil quality was determined using two datasets: total (TDS) and minimum (MDS). A multivariate analysis method was applied, where appropriate scoring functions assigned a score between zero and one to each data set member. Additionally, a weight coefficient was calculated for each member. Finally, the soil quality index, indicating the degree of desirability, was determined using three indices: Nemerlo (NQI), cumulative weighted index (IQI), and simple cumulative index (AQI). A spatial variation map of



soil quality was then prepared using the Inverse Distance Weighting (IDW) method in geographic information system (GIS) software.

Results and Discussion: The results of the principal component analysis (PCA) test indicated that there are three main components that cover 78% of the total variance changes. The first component alone accounts for about 41%, while the second and third components account for 25% and 12% of the total data variance, respectively. Based on the correlation analysis between soil components and characteristics, five characteristics, including organic matter (OM), silt content, gravel, pH and EC were selected as minimum data set (MDS). In the total data set (TDS) collection, the highest weights were assigned to silt and sand (0.093 and 0.095, respectively), while the lowest weight of 0.050 was assigned to bulk density (BD).

In the MDS set, the highest weight was related to organic matter and silt and the lowest weight was related to pH. The soil quality of the region was generally classified as medium based on the two indices of AQI and WQI. However, the NQI method indicated that the soil quality was low. Among the three selected indices with different functions and data sets, the weighted soil quality index with the minimum data set and nonlinear function (WQI_MDS_NL) was chosen as the superior model due to having a higher sensitivity index (or a larger standard deviation). The spatial soil quality map, prepared for this study, showed that approximately 50% of the lands in the region had an average soil quality, while the other 50% had low soil quality.

Conclusion: Organic matter, silt, pH, gravel, and electrical conductivity (EC) are the main characteristics determining the soil quality of the region. In addition, the stability of soil aggregates, bulk density, and lime are the most important limiting factors of soil quality in the region. Therefore, it is suggested to use appropriate management practices, such as conservation tillage and the use of organic fertilizers, to improve these characteristics.

Keywords: *Conservation Tillage, Food Security, Inverse distance weighting, Nemer Index, Soil Functions*

ارزیابی و مدل سازی کیفیت خاک با استفاده از روش تحلیل های چندمتغیره (مطالعه موردی: اراضی کشاورزی دیم شهرستان دزپارت)

سینا بیگدلی^۱، حیدر غفاری^{۲*}، مجتبی نوروزی مصیر^۳ و عبدالامیر معزی^۴

- ۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۲- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
- ۴- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱	<p>امروزه مفهوم کیفیت خاک (SQ) به طور گسترده‌ای برای آگاهی از ظرفیت و محدودیت خاک‌ها در سیستم‌های مختلف محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اهمیت اراضی دیم در تولیدات کشاورزی هدف اصلی این تحقیق مدل سازی و کمی سازی کیفیت خاک بخشی از اراضی کشاورزی دیم شهرستان دزپارت با استفاده از تحلیل چند متغیره یکپارچه و همچنین تعیین حداقل داده‌های موثر می باشد. تعداد ۱۱۹ نمونه خاک به روش مرکب از عمق ۳۰-۰ سانتی-متری خاک اراضی کشاورزی تهیه شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و ویژگی‌های شیمیایی-حاصلخیزی و فیزیکی اندازه گیری شدند. سپس کیفیت خاک‌ها با استفاده از دو مجموعه داده کل (TDS) و حداقل (MDS) و روش تحلیل‌های چندمتغیره با سه شاخص نمودار (NQI)، تجمعی وزنی (IQI) و تجمعی ساده (AQI) تعیین گردید. نتایج آزمون تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) حاکی از آن بود که سه مولفه اصلی وجود دارد که در مجموع ۷۸ درصد تغییرات واریانس کل را پوشش می‌دهند. مولفه اول به تنهایی حدود ۴۱ درصد و مولفه دوم و سوم نیز به ترتیب ۲۵ و ۱۲ درصد واریانس کل داده‌ها را بیان کردند. پنج ویژگی شامل ماده آلی، سیلت، سنگریزه، pH و EC به عنوان اعضای MDS انتخاب شدند. در مجموعه TDS بیشترین وزن‌ها مربوط به سیلت و شن (به ترتیب با ۰/۰۹۳ و ۰/۰۹۵) و در مجموعه MDS مربوط به ماده آلی و سیلت بود. کمترین وزن نیز به ترتیب مربوط به جرم مخصوص ظاهری و pH بود. به طور کلی، بر اساس دو شاخص AQI و WQI کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه در کلاس متوسط قرار گرفتند. اما مقادیر به دست آمده از روش NQI برای کیفیت خاک بیانگر پایین بودن کیفیت خاک منطقه بود. شاخص</p>
پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴	
کلمات کلیدی:	
کارکردهای خاک،	
مجموعه حداقل داده‌ها،	
شاخص نمودار،	
تجزیه مولفه‌های اصلی،	
درونیابی معکوس فاصله،	
امنیت غذایی،	
شخم حفاظتی	
* عهده دار مکاتبات	
Email: h.ghafari@scu.ac.ir	

کیفیت خاک وزنی با مجموعه داده حداقل و تابع غیر خطی (WQI_MDS_NL) به دلیل دارا بودن شاخص حساسیت بیشتر (یا انحراف از معیار بزرگتر) به عنوان مدل برتر انتخاب شد. در نهایت نقشه کیفیت خاک منطقه با استفاده از روش معکوس فاصله وزن دار تهیه شد. بر اساس نقشه تهیه شده حدود ۵۳ درصد اراضی منطقه کیفیت خاک متوسط و ۴۷ درصد اراضی کیفیت خاک پایینی دارند.

مقدمه

خاک را می‌توان یک منبع طبیعی تجدید ناپذیر در نظر گرفت زیرا تشکیل آن به فرآیندهایی کند و پیچیده بستگی دارد. تخریب این منبع به دلیل مدیریت ناکافی باعث ایجاد مشکلات جدی مانند تلفات باروری، کاهش ذخایر کربن و کاهش عملکرد محصول در سراسر جهان شده است، که ممکن است امنیت غذایی سیاره را به خطر بیندازد (۴۰). امروزه مفهوم کیفیت خاک^۱ (SQ) به طور گسترده‌ای برای آگاهی از ظرفیت و محدودیت خاک‌ها در سیستم‌های مختلف محیطی مورد استفاده قرار گرفته است (۲۸، ۱۰). درجه مناسب بودن زمین باتوجه به ظرفیت آن برای ارائه خدمات و انعطاف پذیری آن در برابر شرایط خارجی تعیین می‌شود. از جمله خدمات اصلی خاک می‌توان به تولید محصولات کشاورزی، تصفیه، ذخیره و بازچرخ آب، ترسیب کربن و تنظیم تبادلات گازی، تنظیم چرخه عناصر غذایی و حمایت از سلامتی محیط زیست و موجودات زنده اشاره کرد. بنابراین، کیفیت خاک نشان‌دهنده توانایی یک خاک معین برای ارائه خدمات در یک زیست‌بوم طبیعی یا مدیریت شده است، به نحوی که علاوه بر تولید محصول غذایی کیفیت آب و هوا و سلامت محیط زیست، نیز تضمین شود (۱۴، ۲۵).

تولید زیست توده گیاهی یکی از مهمترین کارکردهای خاک در ارتباط با امنیت غذایی است. بر اساس گزارشات سازمان ملل متحد، گرسنگی و فقر از جمله چالش‌های اصلی جهان در قرن ۲۱ هستند که بیش از ۸۰۰ میلیون نفر را در

سراسر جهان تحت تأثیر قرار داده‌اند. به دلیل تراکم جمعیت و شرایط اقلیمی، بیشترین بار این چالش‌ها را دو قاره افریقا و آسیا به دوش می‌کشند (۳۲). کشور ایران باتوجه به قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک و داشتن منابع آب و خاک محدود به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر این چالش‌ها قرار دارد. از طرفی، امنیت غذایی و بخش عمده‌ای از اقتصاد کشور به شدت به کشاورزی متکی است. در این میان، سهم اراضی دیم در تولیدات کشاورزی مخصوصاً گندم بسیار قابل توجه است. از نظر وسعت حدود نیمی از مساحت کل اراضی کشاورزی ایران به صورت دیم کشت می‌شوند. اما از نظر حجم تولیدات حدود ۱۰ درصد کل محصولات کشاورزی و حدود ۳۰ درصد کل تولید گندم کشور مربوط به این اراضی است. (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱). با این حال، پایداری تولید محصول در این اراضی به دلیل مدیریت ضعیف، شرایط آب و هوایی نامساعد و فرسایش خاک در معرض تهدید قرار دارد. از این رو، برای اطمینان از برنامه‌ریزی مؤثر کاربری اراضی و حفاظت از زمین‌های کشاورزی، انجام ارزیابی‌های کامل و نظارت مستمر بر ویژگی‌های خاک بسیار مهم است (۳۵). امروزه یکی از اهداف اصلی بین‌المللی حفظ کیفیت کلی خاک است (۳۴). این امر مستلزم نظارت و ارزیابی ویژگی‌ها، عملکردها و شرایط مربوط به خاک به منظور تعیین SQ است (۲۰). علاوه بر این، امکان شناسایی زود هنگام عوامل تخریب و نظارت بر تغییرات ناشی از اقدامات مربوط به کاربری زمین و مدیریت خاک را فراهم می‌کند (۲۶).

اخیراً تکنیک‌های متنوعی از جمله رویکردهای کمی و کیفی برای ارزیابی کیفیت خاک توسعه یافته‌اند (۵۰). اما

جمله علوم خاک و مدیریت زیست محیطی بسیار مفید هستند (۱۱). PCA یک روش آماری است که با تعیین دقیق اجزای اصلی (PC) که اکثر اطلاعات داده‌ها را در خود جای داده‌اند، به کاهش تعداد ویژگی‌ها در یک مجموعه داده کمک می‌کند (۲۲).

توابع امتیازدهی به منظور حذف سوگیری ناشی از تفاوت در ماهیت و مقیاس ویژگی‌های مختلف خاک استفاده شده و هر نمایه بین صفر و یک امتیازدهی می‌شود (۱). توابع امتیازدهی به دو گروه خطی (L) و غیرخطی (NL) تقسیم می‌شوند. امتیازات در نهایت با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله مدل‌های تجمعی^۴ (AQI)، تجمعی وزنی^۵ (WQI) و شاخص نمورو^۶ (NQI) در یک شاخص واحد ترکیب می‌شوند (۵۲). AQI تاثیر تمام ویژگی‌ها را برابر در نظر می‌گیرد و میانگین امتیازات را حساب می‌کند، اما در مدل WQI هر نمایه وزن خاص خود را دارد و میانگین امتیازات به صورت وزنی حساب می‌شود. مدل NQI بر اساس میانگین و حداقل امتیاز نمایه‌ها، بدون در نظر گرفتن وزن آنها عمل می‌کند (۳۹). انتخاب شاخص کیفیت خاک مناسب بر اساس حساسیت آنها بوده و مدل با بالاترین حساسیت دقیق‌تر خواهد بود (۹).

تهیه نقشه کیفیت خاک نقش کلیدی در طراحی برنامه‌های مدیریتی دارد. همچنین، درک تغییرپذیری مکانی کیفیت خاک برای ارزیابی ریسک و تصمیم‌گیری ضروری است (۴۴). امروزه نقشه‌های خاک با استفاده از فناوری‌ها و روش‌های نوین مانند سنجش از دور و زمین‌آمار می‌تواند به صورت رقمی انجام شود. در مواردی که محدودیت‌هایی برای دسترسی به داده‌ها وجود دارد، ترکیبی از روش‌های آماری و زمین‌آمار راه‌حلی عملی و کارآمد برای تهیه نقشه ارائه می‌دهد (۳). در این خصوص، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۷ (GIS) ابزاری قوی برای مطالعات مکانی و راهبردهای نظارتی معاصر هستند (۱۳). یکی از قابلیت‌های

تقریباً در همه آنها از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک که به‌طور پیچیده‌ای با کارکردهای خاک در ارتباطند برای تعیین کیفیت خاک استفاده می‌کنند (۱). رویکرد تحلیل‌های چند متغیره یکی از شیوه‌های رایج و کارآمد برای ارزیابی کیفیت خاک است که می‌تواند در شناسایی و تفسیر الگوهای پیچیده در داده‌های خاک مفید واقع گردد. استفاده از تحلیل‌های چند متغیره در ارزیابی کیفیت خاک نه تنها به شناسایی ویژگی‌های کلیدی کمک می‌کند بلکه امکان مقایسه بین کاربری‌های مختلف زمین را نیز فراهم می‌آورد (۱۲). این روش با ایجاد بینش عمیق از وضعیت کیفی خاک، می‌تواند به مدیریت پایدار منابع خاک کمک کند.

غالباً روش تحلیل‌های چند متغیره SQ شامل سه مرحله است: (I) انتخاب ویژگی‌های موثر خاک؛ (II) امتیازدهی ویژگی‌ها که پس از نمره‌دهی به عنوان نمایه شناخته می‌شوند؛ و (III) ادغام امتیازات در یک شاخص واحد که بیانگر وضعیت کلی کیفیت خاک است (۴۵). نمایه‌های کیفیت خاک، ویژگی‌هایی هستند که در پاسخ به تغییرات شرایط خاک به سرعت تغییر می‌کنند (۱۵). مجموعه داده‌های کل^۱ (TDS) و مجموعه داده‌های حداقل^۲ (MDS) دو رویکرد انتخاب نمایه هستند که به‌طور گسترده در ارزیابی کیفیت خاک استفاده شده‌اند (۴۲، ۴۷). در TDS تقریباً تمام نمایه‌هایی که در پایگاه داده‌ای وجود دارند و یا قابل اندازه‌گیری هستند، انتخاب می‌شوند، در حالی که MDS تعداد محدودی از ویژگی‌های خاک را در بر دارد و بر اساس همبستگی بین نمایه‌ها انتخاب می‌شوند. اعضای MDS برای هر منطقه منحصر به فرد بوده و قبل از ارزیابی باید شناسایی شوند (۲۰). تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی^۳ (PCA) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای تکنیک‌های رایجی هستند که در تعیین اعضای MDS استفاده می‌شوند. این روش‌های تحلیلی به‌طور قابل توجهی به افزایش درک ما از داده‌ها کمک می‌کنند و در هدایت تصمیم‌گیری آگاهانه در زمینه‌های مختلف، از

4 - Additive Quality Index

5 - Weighted Quality Index

6 - Nemoro Quality Index

7 - Geographic Information System

1 - Total Data Set

2 - Minimum Data Set

3 - Principal Component Analysis

دمای زمستان و تابستان به ترتیب ۹/۱ و ۳۱/۳ درجه سانتی-گراد می‌باشد. واحدهای مورفولوژیک غالب در منطقه شامل دشت آبرفتی و مخروط افکنه بوده و از نظر زمین‌شناسی، منطقه عمدتاً تحت پوشش سازندهای آجاجاری و آسماری است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و مزیک تعیین شده است (۱۹).

نمونه‌برداری خاک

پس از بررسی نقشه‌های توپوگرافی و کاربری اراضی منطقه و همچنین بازدیدهای میدانی، تعداد ۱۱۹ نمونه خاک مرکب از اراضی کشاورزی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک تهیه شد. نمونه‌برداری خاک به شکل تصادفی طبقه‌بندی شده انجام گرفت تا سطوح مختلف ژئومورفولوژیک در منطقه به طور مناسبی پوشش داده شود. به طور کلی، دو واحد ژئومورفیک در منطقه شناسایی شد: مخروط افکنه و دشت رسوبی که از مجموع کل نمونه‌ها، تعداد ۳۸ نقطه در سطوح مخروط افکنه و مابقی در دشت سیلابی قرار داشتند. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها جهت تعیین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی‌های شیمیایی، حاصلخیزی و فیزیکی خاک شامل واکنش، هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل دسترس، فسفر قابل جذب، آهک، بافت، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، نفوذپذیری، مقدار سنگریزه خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی بودند که باتوجه به بررسی منابع و نظر کارشناس انتخاب شدند.

بافت خاک به روش هیدرومتری، سنگریزه به شکل وزنی، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه، نفوذپذیری خاک به روش استوانه مضاعف، ماده آلی خاک به روش سوزاندن با دی‌کرومات پتاسیم، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک تر تعیین شدند. هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع و واکنش خاک در گل اشباع به ترتیب با دستگاه EC متر (HANNA مدل HI ۹۰۱۷) و دستگاه pH متر (مدل RPB1000) اندازه‌گیری شدند (۴۶).

همچنین نیتروژن به روش کجلدال، فسفر به روش اولسن، کربنات کلسیم معادل به روش واکنش با اسید کلریدریک،

تجزیه و تحلیل آماری GIS استفاده از تکنیک‌های درون-یابی است که برای پیش‌بینی و مطالعه تغییرات مکانی متغیرها در مکان‌های نمونه‌برداری نشده به‌ویژه در زمینه خاک‌شناسی بسیار مهم است (۱۸). روش‌های درون‌یابی متعددی وجود دارد: از جمله روش وزن‌دهی معکوس فاصله^۱ (IDW)، کریجینگ معمولی^۲ (OK)، لوگ کریجینگ^۳ (LOK) و کوکریجینگ^۴ (COK) که کارایی هر کدام برای نشان دادن توزیع فضایی کیفیت خاک در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است (۴۳)، (۴۴). درون‌یابی نوعی تخمین ریاضی از متغیرها در مکان‌های نمونه‌برداری نشده است.

بنابر مطالب فوق، هدف اصلی این پژوهش (۱) ارزیابی و نقشه‌برداری SQI در بخشی از اراضی کشاورزی دیم شهرستان دزپارت در استان خوزستان با استفاده از تحلیل چند متغیره یکپارچه، (۲) تعیین حداقل مجموعه داده‌های شاخص-های کیفیت خاک، (۳) بررسی قابلیت و دقت استفاده از MDS در ارزیابی کیفیت خاک اراضی کشاورزی به جای TDS و (۴) شناسایی بهترین مدل برای بیان کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه بود. تحلیل چند متغیره یکپارچه با استفاده از دو مجموعه داده (MDS و TDS) و سه مدل نمایه‌سازی شامل شاخص AQI، WQI و NQI انجام شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه

منطقه مورد مطالعه واقع در شرق استان خوزستان در حوالی شهرستان دزپارت و در بخشی از حوزه آبخیز کارون واقع شده است (شکل ۱). حداکثر و حداقل ارتفاع منطقه به ترتیب ۲۲۰۰ و ۸۳۰ متر از سطح دریا و میانگین آن ۱۲۰۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه دراز مدت براساس آمار سازمان هواشناسی (۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴) ۵۴۹/۵ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین

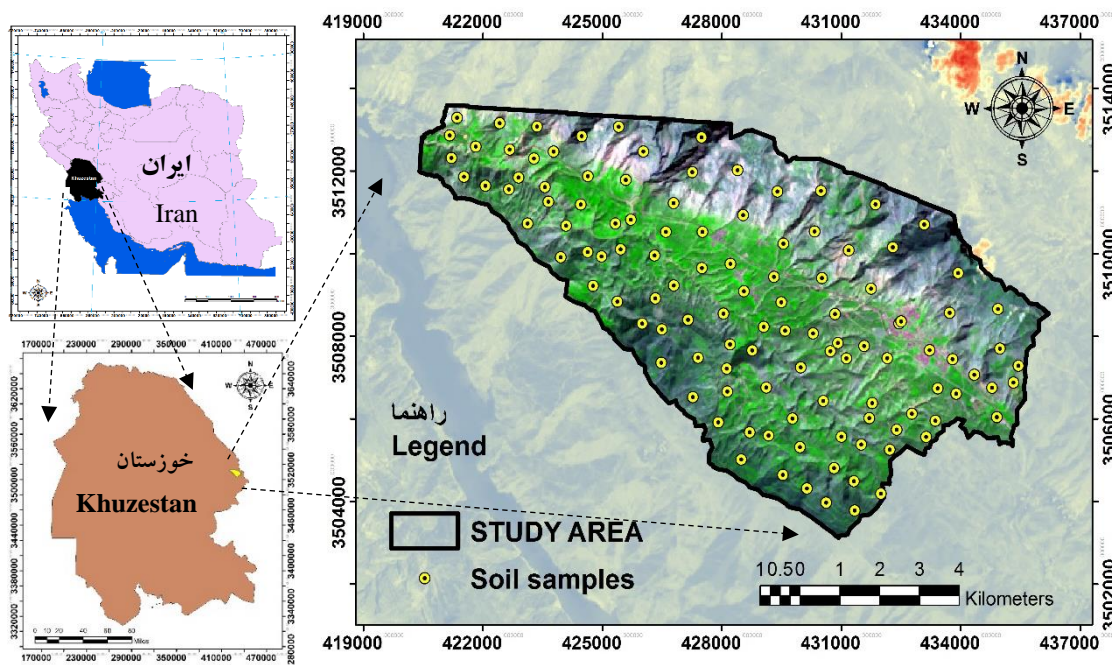
- 1 - Inverse Distance Weighting
- 2 - Ordinary Kriging
- 3 - Log Kriging
- 4 - Co-Kriging

سپس، نمایه‌هایی که شرایط زیر را دارند به عنوان MDS در نظر گرفته می‌شوند (۵۲): در هر مؤلفه، نمایه‌ای که بیشترین ضریب همبستگی را با مؤلفه دارد به همراه نمایه‌هایی با اختلاف ضریب همبستگی کمتر از ۱۰ درصد نسبت به آن انتخاب می‌شوند. چنانچه اختلاف بین ضریب همبستگی سایر نمایه‌ها با نمایه‌ای که بیشترین همبستگی را دارد بیشتر از ۱۰ درصد باشد، فقط همان یک نمایه با حداکثر ضریب همبستگی انتخاب می‌شود. اما زمانی که در هر مؤلفه چندین نمایه شرایط انتخاب شدن را داشتند، باید ضریب همبستگی بین نمایه‌ها نیز بررسی شود و چنانچه بین نمایه‌ها همبستگی بالایی وجود داشته باشد، یکی از آنها حذف شده و اگر بین آنها همبستگی ضعیف باشد، هر دو انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که برای اطمینان از کافی بودن حجم نمونه‌ها، قبل از آزمون تجزیه مؤلفه‌های اصلی از آزمون KMO و کرویت بارتلت استفاده شد.

کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری و غلظت سدیم و پتاسیم به روش فلیم فتومتر (مدل M410، شرکت Sherwood) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم تعیین شدند (۴۶، ۳۰).

مدل‌سازی کیفیت خاک

شاخص‌های چندمتغیره کیفیت خاک با استفاده از دو مجموعه داده شامل مجموعه داده‌های کل (TDS) و مجموعه داده‌های حداقل (MDS) مدل‌سازی شدند. تمام چهارده ویژگی شیمیایی و فیزیکی ارائه شده در بخش قبلی در TDS استفاده شدند. محدودیت این رویکرد این است که برای اندازه‌گیری همه این ویژگی‌های هزینه و زمان زیادی لازم است. برای تعیین اعضای MDS از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. هدف از آزمون PCA کاهش تعداد متغیرها به یک مجموعه کوچکتر است، به نحوی که این مجموعه داده‌های حداقلی بیشترین تغییرات موجود در داده‌ها را منعکس کنند و اطلاعات موجود در متغیرها نیز حفظ شود (۲۴). در این روش مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از ۱ به عنوان MDS انتخاب می‌شوند.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور

Figure (1) The location of the studied area in the province and the country

$$NLS = \frac{1}{1 + (X/X_m)^b} \quad (1)$$

که X مقدار ویژگی، X_m میانگین مقدار ویژگی در منطقه و b شیب معادله است که برای حالت بیشتر-بهرتر ۲/۵- و برای حالت کمتر-بهرتر ۲/۵+ در نظر گرفته می‌شود (۴۲).

کمی‌سازی کیفیت خاک

روش‌های گوناگونی برای تجمیع امتیازات و بیان کمی کیفیت خاک وجود دارد که در اینجا از سه روش تجمعی ساده (AQI)، تجمعی وزنی (WQI) و روش نمورو (NQI) (معادلات ۲ تا ۴) استفاده شد (۴۹). در روش تجمعی ساده، وزن همه نمایه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود، در حالی‌که در روش WQI وزن‌ها متفاوت بوده و هر نمایه‌ای که وزن بالاتری داشته باشد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. شاخص نمورو بر اساس مقادیر میانگین و حداقل داده‌ها محاسبه می‌شود و نیاز به وزن دهی ویژگی‌های خاک نمی‌باشد.

$$AQI = \sum_{i=1}^n \frac{Si}{n} \quad (2)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n Wi Si \quad (3)$$

$$NQI = \frac{\sqrt{P^2 ave + P^2 min}}{2 \times \frac{n-1}{n}} \quad (4)$$

در روابط ۱ تا ۳ علامت Si امتیاز هر ویژگی است که توسط دو تابع خطی و غیرخطی محاسبه شدند؛ Wi وزن هر ویژگی است که از طریق آزمون تجزیه عامل به دست آمد، و n تعداد ویژگی‌ها را نشان می‌دهد. علائم P_{min} و P_{ave} نیز به ترتیب میانگین و حداقل امتیاز کسب شده برای ویژگی مورد نظر در مجموعه داده‌ها را نشان می‌دهد. شاخص‌های بالا برای هر دو مجموعه داده TDS و MDS به طور مستقل محاسبه شدند. در نتیجه برای هر نمونه، دوزاده شاخص کلی کیفیت خاک محاسبه گردید.

وزن‌دهی و امتیازدهی

از آنجایی که میزان اثرگذاری هر نمایه بر کارکردهای خاک می‌تواند متفاوت باشد، اقدام به وزن‌دهی آنها می‌شود. تعیین اوزان نمایه‌ها در هر دو مجموعه داده با استفاده از روش تحلیل عاملی (FA) انجام شد (۳۳). در این روش متغیرها از طریق بررسی ساختار آماری و درجه ارتباط بین آنها رتبه‌بندی و اولویت‌بندی می‌شوند. نسبت سهم هر متغیر به مجموع کل سهم‌ها رتبه آن را تعیین می‌کند. هرچه رتبه یک متغیر بیشتر باشد، نشان‌دهنده اهمیت بیشتر آن است (۷). این آزمون در نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۲۰ انجام شد.

پس از وزن‌دهی، امتیازدهی نمایه‌ها انجام شد. علت امتیازدهی به نمایه‌ها متفاوت بودن مقیاس و ماهیت آنهاست. لذا، از نظر ریاضی قابل جمع یا قابل ضرب نیستند. برای این-که بتوان ارزش نمایه‌ها را در قالب یک شاخص کلی ارائه کرد، باید بی بعد شوند. برای بی بعد کردن متغیرها و یا به اصطلاح استانداردسازی آنها از توابع نرمال‌سازی استفاده می‌شود که مقدار هر متغیر را تبدیل به اعدادی بین صفر و یک می‌کند. هرچه عدد به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وضعیت مطلوب‌تر آن متغیر است (۵۲). ویژگی‌های خاک از نظر مطلوبیت به سه گروه تقسیم می‌شوند: الف) ویژگی‌هایی که هرچه مقدار آنها بیشتر باشد، مطلوب‌تر است (بیشتر-بهرتر)، ب) ویژگی‌هایی که هر چه مقدار آن کمتر باشد، مطلوب‌تر است (کمتر-بهرتر) و ج) ویژگی‌هایی که حد وسط آنها مطلوب‌تر است (وسط-بهرتر یا بهینه). گروه اول مانند میانگین وزنی قطر خاکدانه، گروه دوم مانند SAR، و گروه سوم مانند pH (۷، ۳۳، ۵۴). آگاهی از آستانه‌های بالا و پایین یا بهینه ویژگی‌ها لازمه امتیازدهی است. این حدود آستانه‌ای بستگی به شرایط اقلیمی، نوع محصول، نوع بافت خاک و کارکرد مورد انتظار از خاک دارند (۴، ۳۷). در این پژوهش از حدود آستانه‌ای ارائه شده در جدول ۱ برای امتیازدهی استفاده شد. توابع امتیازدهی خطی نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند و امتیازدهی غیرخطی با استفاده از معادله ۱ انجام شد.

شاخص حساسیت بیشتر نشان‌دهنده توانایی بیشتر مدل برای انعکاس تغییرات کیفیت خاک است.

$$SI = \frac{SQI_{max}}{SQI_{min}} \quad (5)$$

در رابطه ۴، SI شاخص حساسیت، SQI_{min} و SQI_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار SQI محاسبه شده با مدل می‌باشند.

ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک

بهترین راه برای اعتبارسنجی مدل‌های SQI این است که همبستگی شاخص‌ها با کارکردهای مورد انتظار از خاک مانند عملکرد محصول بررسی شود (۵۱، ۲۷). اما، به دلیل فقدان داده‌های مکانی عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه استفاده از این رویکرد میسر نبود. لذا از روش دوم که محاسبه شاخص حساسیت است، استفاده شد. شاخص حساسیت (SI)، تکنیکی است که توسط ماستو و همکاران (۲۰۰۸) توصیف شده و از معادله ۵ محاسبه می‌شود (۳۱).

جدول (۱) آستانه‌ها و توابع امتیازدهی به ویژگی‌های خاک

Table (1) Thresholds and scoring functions for soil characteristics

منبع Resource	توابع خطی استاندارد Linear scoring functions	حد بالا			نوع تابع Type of function	ویژگی‌ها Soil property
		حد بهینه (O) optimum threshold	(U) Upper threshold	حد پایین (L) Lower threshold		
Singh et al. (2007)	$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq L \\ 1 - 0.9 \frac{x-L}{U-L} & L \leq x \leq U \\ 0.1 & x \geq U \end{cases}$		8	1.5	کمتر بهتر	EC (ds.m ⁻¹)
			1.9	1.3	less-is-better	BD (gr.cm ⁻³)
			13	5		SAR (mmol/l)
			20	5		G (%)
			3.4	0.35		MWD (mm)
Delgado (2003) Velmurugun (2000)	$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq L \\ 0.1 + 0.9 \frac{x-L}{U-L} & L \leq x \leq U \\ 1 & x \geq U \end{cases}$		15	3	بیشتر بهتر	CEC (cmol/kg)
			2	0.5	more-is-better	OM (%)
			0.2	0.05		N (%)
Andrews (2003) Vlek (2004)	یکی از توابع بالا که بستگی به موقعیت ویژگی نسبت به حالت بهینه دارد (اگر مقدار ویژگی کمتر از مقدار بهینه بود، تابع بیشتر بهتر استفاده می‌شود و اگر بیشتر از مقدار بهینه بود، تابع کمتر بهتر استفاده می‌شود). One of the above functions (depending on the conditions)	6.5-7	8.5	5.5		pH
		40	60	20		Sand (%)
		35	60	10	مقدار بهینه	Silt (%)
		25	35	15	Optimal Range	Clay (%)
		25	40	10		P (ppm)
	20	30	10		CCE (%)	

X: مقدار اندازه‌گیری شده برای هر ویژگی، f(x): امتیاز ویژگی‌ها بین ۰/۱ تا ۱، L: آستانه پایین، U: آستانه بالا، O: مقدار بهینه.

EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، SAR: نسبت سدیم جذبی، G: سنگریزه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، OM: محتوی ماد آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش خاک، Sa: شن، Si: سیلت، C: رس، P: فسفر قابل جذب، CCE: کرنات کلسیم معادل

تهیه نقشه مکانی کیفیت خاک

درون‌یابی یکی از شیوه‌های رایج در تحلیل داده‌های جغرافیایی و زمین‌شناسی است که برای تخمین ویژگی‌ها در نقاط داده‌برداری نشده استفاده می‌شود. فرض اساس در روش‌های درون‌یابی این است که نقاط نزدیک‌تر به یک نقطه هدف، بیشترین تاثیر و شباهت را به آن نقطه دارند. در این پژوهش از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) که یکی از روش‌های ساده برای درون‌یابی است استفاده شد. این روش از معکوس فاصله بین نقاط معلوم و مجهول برای محاسبه وزن‌ها استفاده کرده و فاقد مدل‌سازی آماری پیچیده و فرضیات مرتبط با داده‌ها است (معادله ۶). معمولاً استفاده از این روش برای داده‌هایی که توزیع نسبتاً یکنواخت دارند توصیه شده است. مقدار یک ویژگی در نقطه مجهول از طریق میانگین وزنی آن ویژگی در نقاط مشاهده‌ای در اطراف آن بدست می‌آید (۸).

$$Z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (6)$$

که در آن، $Z(X_0)$ مقدار درونیابی شده و n تعداد کل نقاط نمونه و β توان وزنی ($\beta=2$) است. x_i مقادیر اندازه‌گیری شده (معلوم) و h_{ij} فاصله بین نقطه مجهول و نقاط مشاهده‌ای می‌باشد.

درون‌یابی در نرم افزار ArcGIS انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌ها فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. از بین ذرات معدنی تشکیل دهنده خاک، بخش سیلت با میانگین ۴۵/۹۶ بیشترین درصد فراوانی نسبی را داشت و کلاس‌های لوم رسی و لوم رسی سیلتی کلاس‌های غالب بافت خاک‌های منطقه بودند. از بین ذرات اصلی تشکیل دهنده خاک، بیشترین دامنه و ضریب تغییرات (۵۰ درصد) مربوط به بخش شن بود که دامنه آن بین ۴ تا ۵۹ درصد متغیر

است. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز با ضریب تغییرات ۶۵ درصد و میانگین ۰/۲۶ میلی‌متر دارای تغییرپذیری زیادی بود، به طوری که کمترین مقدار ۰/۰۱ میلی‌متر و بیشترین مقدار ۰/۷۲ میلی‌متر بود. میانگین جرم مخصوص ظاهری و MWD خاکها به ترتیب ۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۲۶ میلی‌متر بود.

بررسی ویژگی‌ها شیمیایی خاک‌ها نشان داد که فسفر، ماده آلی و شوری خاک دارای بیشترین ضریب تغییرات هستند (جدول ۲). حداکثر و حداقل مقدار ماده آلی خاک‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۲/۱ درصد با میانگین ۱/۲ درصد تعیین شد که نسبتاً مطلوب است. آهک خاک‌ها بین ۸ تا ۶۶ درصد با میانگین ۳۴ درصد بود و خاک‌ها در گروه خاک‌های آهکی طبقه‌بندی می‌شوند. متوسط واکنش و شوری خاک‌های منطقه به ترتیب ۷/۴۹ و ۰/۶۲ دسی‌زیمنس بر متر بود و در وضعیت نسبتاً مطلوبی قرار دارند. دامنه ظرفیت تبادل خاک‌ها بین ۱۰ و ۳۸ سانتی‌مول بر کیلوگرم متغیر بود و میانگین آن‌ها برابر ۲۶ به دست آمد. متوسط غلظت N برابر با ۰/۰۸ درصد و غلظت کل P و K در خاک‌های منطقه به ترتیب ۵۲ و ۲۱۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بدین ترتیب، خاک‌ها از نظر عناصر غذایی پر مصرف شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم محدودیتی ندارند، اما زیادی فسفر از طریق فرایند فرسایش خاک می‌تواند موجب آلودگی محیط زیست گردد.

نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) نشان داد که اکثر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به استثنای جرم مخصوص ظاهری، آهک، فسفر و pH از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. لذا، قبل از تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از تبدیل‌های لگاریتمی (EC، MWD، OM) و مثلثاتی (سیلت، CEC) و یا روش IDF (سایر متغیرها) نرمال شدند. مقادیر چولگی و کشیدگی نیز موکد وضعیت نرمال نبودن داده‌ها است. در توزیع نرمال چولگی صفر و کشیدگی ۳ می‌باشد. نتایج آزمون K-S ارائه شده در جدول ۲ مربوط به حالت نرمال شده متغیرها پس از تبدیل می‌باشد.

جدول (۲) آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مطالعه شده

Table (2) Descriptive statistics of the physical characteristics of the studied soils

ویژگی	دامنه	حداقل	حداکثر	میانگین	خطای استاندارد	ضرب تغییرات	چولگی	کشیدگی	آزمون
Soil property	Range	Min.	Max.	Ave.	Std. Error	CV	Skew.	Kurt.	K-S
C (%)	28.59	16.80	45.39	32.74	.488	16.1	-.403	.63	.143
Si (%)	48.34	8.73	57.07	45.96	.758	17.9	-1.67	4.15	.155
Sa (%)	55.00	4.21	59.21	21.28	.996	50.7	1.82	3.78	.185
G (%)	22.00	2.00	24.00	12.17	.558	49.6	.26	-.94	.097
MWD (mm)	.70	.01	.72	.26	.015	65.4	.78	-.26	.125
BD (g/cm ³)	.56	1.10	1.66	1.36	.011	9.0	.21	-.65	.075
pH	.61	7.20	7.81	7.49	.015	2.2	-.042	-1.04	.079
EC (dS/m)	.92	.21	1.13	.62	.024	41.6	.355	-1.00	.097
OM (%)	2.21	.50	2.16	1.19	.049	45.4	-.705	-.19	.124
CCE (%)	58.50	8.00	66.50	34.73	1.109	34.6	.142	-.53	.067
N (%)	.15	.01	.16	.08	.002	32.5	.359	1.19	.119
P (ppm)	113.09	2.60	110.48	52.28	2.085	43.1	.140	-.52	.063
K (ppm)	303.85	84.99	388.84	211.95	6.093	31.1	.041	-.61	.100
CEC (cmol/kg)	28.53	10.41	38.94	26.79	.511	20.7	-.488	.62	.119

EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، SAR: نسبت سدیم جذب، G: سنگریزه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، OM: محتوی ماد آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش خاک، Sa: شن، Si: سیلت، C: رس، P: فسفر قابل جذب، CCE: کربنات کلسیم معادل

همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

نتایج همبستگی بین ویژگی‌های مختلف خاک‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. بین مقدار ماده آلی خاک‌ها (OM) با بیشتر ویژگی‌های خاک همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. به طوری که همبستگی OM با pH، CCE، Sa، G و BD از نوع منفی یا معکوس به دست آمد و با سایر ویژگی‌ها مثبت بود. رابطه معکوس بین ماده آلی و واکنش خاک توسط سایر پژوهشگران (۵۵، ۲۱) نیز بیان شده و دلیل اصلی آن تولید اسیدهای آلی و همچنین تاثیر واکنش خاک بر فعالیت باکتری‌ها ذکر شده است. به همین ترتیب، رابطه بین ماده آلی و CCE قابل توجه است. علاوه بر این، احتمالاً وضعیت توپوگرافی و زهکشی می‌تواند بر رابطه بین ماده آلی و CCE تاثیر گذار باشد. رابطه معکوس بین ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری نیز به دلیل تاثیر ماده آلی بر خاکدانه‌سازی و تخلخل خاک است. بیشترین همبستگی OM با رس و نیتروژن و کمترین مربوط به شوری، سیلت و جرم مخصوص ظاهری بود. برخی پژوهشگران نیز همبستگی بالایی بین ماده آلی خاک و مقدار رس گزارش کرده‌اند (۶). تشکیل کمپلکس بین ذرات رس و مواد آلی، مواد آلی را در برابر تجزیه محافظت می‌کند. بیشترین همبستگی شوری با CEC مشاهده شد. معمولاً افزایش CEC با افزایش EC همراه است، زیرا

کاتیون‌های تبدلی با املاح موجود در فاز محلول خاک که مسبب شوری هستند، در حال تعادل می‌باشند (Sainju and Liptzin, 2022) و هرچه ظرفیت بادل کاتیونی بیشتر باشد، املاح محلول نیز افزایش می‌یابد. میانگین قطر خاکدانه‌ها بیشترین همبستگی را با مقدار رس، ماده آلی و نیتروژن خاک داشت. محققان دیگری نیز رابطه‌ای قوی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و ماده آلی گزارش دادند (۲۹).

شاخص‌های چندمتغیره کیفیت خاک‌ها

تجزیه مولفه‌های اصلی و تعیین حداقل مجموعه داده‌ها

مقدار KMO برای نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش برابر با ۰/۷۶ به دست آمد (بزرگتر از ۰/۷) که نشان‌دهنده مناسب بودن حجم نمونه‌ها است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که حجم نمونه برای تحلیل عاملی کافی بوده است. همچنین آزمون کرویت بارتلت معنی‌دار شده است. پس از کسب اطمینان از کفایت داده‌ها، آزمون PCA برای تعیین اعضای مجموعه حداقل داده‌ها انجام شد. طبق جدول ۴ تعداد سه مولفه اصلی شناسایی شد که مقادیر ویژه آنها بزرگتر از یک بود. به عبارتی دیگر، از این سه مولفه اصلی حداکثر اطلاعات مربوط داده‌ها قابل احصا است. بر اساس مجموع مربعات بارهای چرخشی،

شرقی دشت قزوین انجام دادند (۱۶)، تعداد سه مولفه اصلی را شناسایی کردند و از بین ۱۷ ویژگی تعداد هفت ویژگی شامل نیتروژن زیتوده میکروبی، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع، آب قابل استفاده گیاه، میزان شن، واکنش خاک و هدایت الکتریکی را به عنوان اعضای مجموعه داده‌های حداقل انتخاب کردند. آذر نشان و همکاران^۲ (۲۰۱۸) نیز در مطالعه‌ای که در مناطق خشک و نیمه خشک دشت قزوین انجام دادند (۵)، خود مقدار رس، شن، سیلت، کربن آلی، آهک، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، فسفر و پتاسیم را به عنوان حداقل داده‌ها جهت مطالعه کیفیت خاک منطقه معرفی کردند. همچنین در گزارش تقی پور و همکاران^۳ (۲۰۲۳)، مقدار رس، ماده آلی، میانگین وزنی خاکدانه‌ها و محتوی فسفر به عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها برای کمی‌سازی کیفیت خاک اراضی مرتعی و زراعی جنوب استان گیلان انتخاب شدند (۴۹).

تعیین وزن اعضای MDS و TDS

پس از تعیین اعضای مجموعه حداقل داده‌ها، با استفاده از آزمون تحلیل عاملی و بر اساس نسبت واریانس مشترک هر نمایه به واریانس کل، وزن معیارها برای هر دو مجموعه داده به صورت جداگانه تعیین گردید. همان‌طور که در جدول ۵ قابل ملاحظه است، در مجموعه TDS، وزن نمایه‌ها بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۹ متغیر بود. بیشترین وزن‌ها مربوط به سیلت و شن (به ترتیب با ۰/۰۹۳ و ۰/۰۹۵) و کمترین وزن با مقدار ۰/۰۵ به جرم مخصوص ظاهری اختصاص پیدا کرد. در مجموعه حداقل داده‌ها، بیشترین واریانس مشترک و وزن مربوط به ماده آلی و سیلت و کمترین وزن مربوط به pH بود. وزن ویژگی‌ها نیز بستگی به شرایط منطقه و خصوصیات آماری پایگاه داده دارد و در هر منطقه متفاوت است. به عنوان مثال، کامالی و همکاران^۴ (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای که با هدف شناسایی ویژگی‌های موثر در ارزیابی کیفیت خاک اراضی کشاورزی دشت محمدشهر کرج انجام دادند (۲۳)، در مجموعه داده TDS ویژگی‌هایی مانند SAR، مواد آلی و آهک دارای بیشترین وزن و جرم مخصوص ظاهری

مولفه اول به تنهایی حدود ۴۱ درصد واریانس کل را تبیین کرده است. مولفه دوم و سوم نیز به ترتیب ۲۵ و ۱۲ درصد واریانس کل داده‌ها را بیان می‌کنند. در مجموع هر سه مولفه می‌توانند حدود ۷۸ درصد تغییرات داده‌های مرتبط با کیفیت خاک را در منطقه مطالعاتی پوشش دهند.

گام بعدی در تعیین MDS تعیین متغیرهای وابسته به هر مولفه است. یعنی هر مولفه اصلی اطلاعات کدام متغیرها را در خود جای داده است. برای این منظور از همبستگی پیرسون بین متغیرها و مولفه‌ها استفاده می‌شود که در جدول ۴ تحت عنوان ماتریس چرخش یافته مولفه‌ها ارائه شده است. معمولاً متغیر یا متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با مولفه دارند، انتخاب می‌شوند. بر این اساس، مولفه اصلی که عمدتاً انعکاسی از ویژگی‌های شیمیایی خاک است، بیشترین همبستگی را به ترتیب با نیتروژن کل، رس، ماده آلی و واکنش خاک داشت که بر اساس همبستگی بین این متغیرها، رس و نیتروژن حذف شدند و ماده آلی و واکنش خاک به عنوان اعضای MDS انتخاب شدند. در مولفه اصلی دوم، سیلت و شن به ترتیب با ۰/۹۲۸ و ۰/۹۳۶ بیشترین همبستگی را نشان دادند که با توجه به همبستگی بالای بین رس و سیلت، سیلت به عنوان موثرترین نمایه برای مولفه دوم انتخاب شد. در خصوص مولفه سوم، سنگریزه و هدایت الکتریکی بیشترین همبستگی را داشتند که به دلیل عدم وجود همبستگی بین آنها، هر دو نمایه انتخاب شدند. بنابراین، ماده آلی، pH، سیلت، هدایت الکتریکی و سنگریزه به عنوان موثرترین نمایه‌ها در تعیین کیفیت خاک و اعضای MDS تعیین شدند. بدیهی است با توجه به همبستگی موجود بین ویژگی‌های خاک، تاثیر و نقش آن دسته از ویژگی‌های مهم خاک که به عنوان MDS انتخاب نشده‌اند (مانند میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و یا ظرفیت تبادل کاتیونی و غیره) از طریق ویژگی‌های منتخب در کیفیت خاک منعکس می‌شود. تعداد مولفه‌های اصلی و نمایه‌های خاک مرتبط با هر مولفه بستگی به شرایط منطقه و خصوصیات آماری اعضای پایگاه داده دارد. لذا، برای هر منطقه منحصر به فرد هستند. به عنوان مثال، گرجی و همکاران^۱ (۲۰۱۸) در مطالعه خود که به منظور ارزیابی کیفیت خاک اراضی جنوب

2- Azarneshan et al.

3- Taghipour et al.

4- Kamali et al.

1- Gorji et al.

جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بین هر سه شاخص کیفیت خاک صرف نظر از نوع مجموعه داده و نوع مدل امتیازدهی، رابطه معنی‌دار و قوی (۹۸ تا ۹۹ درصد) وجود دارد (شماره ۱ تا ۳). همبستگی بین شاخص‌های مختلف با در نظر گرفتن دو مدل خطی و مدل غیرخطی حدود ۷۶ درصد و در مجموعه داده‌های کل و حداقل در حدود ۶۰ درصد بود. در دو مورد همبستگی ۱۰۰ درصدی مشاهده شد: یکی بین AQI-TDS-NL و NQI-TDS-NL و دیگری بین AQI-MSD-NL و NQI-MDS-NL. کمترین همبستگی به میزان ۵۷ درصد نیز بین دو مدل AQI-WQI و NQI-MDS-L-TDS-L مشاهده شد.

سهم نسبی نمایه‌ها در کیفیت خاک

برای نشان دادن اهمیت نسبی هر نمایه در مقدار نهایی کیفیت خاک، از حاصلضرب وزن و امتیاز هر ویژگی استفاده شد. نتایج به صورت نمودار عنکبوتی ارائه شده است. هرچه حاصل ضرب وزن و امتیاز یک ویژگی بزرگتر باشد، نشان دهنده اهمیت بیشتر آن نمایه در میزان کیفیت خاک است. بر اساس مجموعه کل داده‌ها (شکل ۲) مقدار سیلت، EC و pH بیشترین تاثیر را در افزایش شاخص کیفیت خاک ایفا کردند. در مقابل ویژگی‌هایی مانند MWD، فسفر و آهنک بیشتر تاثیر را در کاهش کیفیت خاک داشتند. به‌طور کلی، به استثنای واکنش خاک که در برخی مزارع به دلیل آهنکی بودن برای رشد گیاه محدودیت ایجاد می‌کند، وضعیت سایر ویژگی‌های شیمیایی و تغذیه‌ای خاک‌های برای کشت گندم مناسب است. همچنین از نظر فیزیکی، زیاد بودن جرم مخصوص ظاهری و کم بودن پایداری خاکدانه‌ها از طریق کاهش آب قابل استفاده گیاه و فرسایش خاک می‌توانند محدودیت ایجاد کنند و لذا، نیاز به مدیریت مناسب دارند. نتایج مطالعه یارعلی دوست و همکاران^۲ (۱۳۹۸) نیز نشان داد که در اراضی دیم نیمه خشک لردگان که در مجاورت منطقه مورد مطالعه قرار دارد، پایداری خاکدانه‌ها و pH نسبت به سایر کاربری‌ها محدودیت بیشتری برای کارکردهای خاک ایجاد می‌کنند (۵۳).

کمترین وزن را در ارزیابی کیفیت خاک لایه سطحی داشتند. همچنین در مجموعه MDS میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سیلت و رطوبت قابل استفاده گیاه بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند.

وضعیت کیفیت خاک منطقه

در این مطالعه، از سه شاخص کیفیت خاک AQI، WQI و NQI با دو مجموعه داده کل و حداقل و دو مدل امتیازدهی برای کمی‌سازی کیفیت خاک استفاده شد. در مجموع به ۱۲ حالت مختلف کیفیت خاک ارزیابی شد. بر اساس دو شاخص AQI و WQI کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه طبق طبقه بندی کای و همکاران^۱ (۲۰۰۹، ۳۸) در کلاس متوسط قرار دارند. اما مقادیر به دست آمده از روش NQI برای کیفیت خاک بیانگر پایین بودن کیفیت خاک منطقه است. اختلاف معنی‌داری بین روش‌های مخلف کمی‌سازی کیفیت خاک مشاهده شد (جدول ۶). تاثیر نوع مجموعه داده به این صورت بود که مقادیر AQI و WQI حاصل از مجموعه کل داده‌ها در مقایسه با مجموعه حداقل داده‌ها سطح پایین تری را نشان دادند. اما در مورد شاخص NQI نوع پایگاه داده (MDS و TDS) چندان موثر نبود و اختلاف قابل توجهی بین مجموعه داده‌ها مشاهده نشد. همچنین اختلاف معنی‌داری بین توابع خطی و غیرخطی مشاهده شد (جدول ۶). به طوری که مقادیر کیفیت خاک هنگام استفاده از توابع خطی نسبت به مدل غیرخطی در سطح بالاتری قرار گرفتند. در نهایت، از بین سه شاخص با توابع مجموعه داده‌های مختلف، شاخص کیفیت خاک وزنی با مجموعه داده حداقل و تابع غیرخطی (WQI_MDS_NL) به دلیل دارا بودن شاخص حساسیت بیشتر (با انحراف از معیار بزرگتر) به عنوان مدل برتر انتخاب شد. به عبارت دیگر، مدل WQI_MDS_NL نسبت به سایر مدل‌ها تغییرات بین کیفیت خاک‌ها را بهتر نشان می‌دهد.

همبستگی بین شاخص‌ها و رویکردهای مختلف کیفیت خاک

مقادیر همبستگی پیرسون بین شاخص‌های مختلف کیفیت خاک، (هر کدام با دو مجموعه داده و دو تابع امتیازدهی) در

بیگدلی و همکاران: ارزیابی و مدل‌سازی کیفیت خاک با...

انتخاب شده بود، تهیه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بر اساس تقسیم‌بندی کای و همکاران (۲۰۰۹؛ ۳۸) خاک‌های منطقه از نظر کیفیت تقریباً به طور مساوی در دو کلاس متوسط (۴۷ درصد) و ضعیف (۵۳ درصد) قرار دارند. خاک‌های با کیفیت متوسط عمدتاً در شرق و غرب و خاک‌های با کیفیت کمتر در بخش مرکزی منطقه حضور دارند. به طور کلی، از نظر ژئومورفولوژی مخروط افکنه‌ها نسبت به دشت‌های آبرفتی کیفیت خاک کمتری داشتند. لازم به ذکر است که در قسمت‌هایی از شرق منطقه به صورت موضعی (شکل ۳-ب) خاک دارای کیفیت نسبتاً خوبی است که احتمالاً ناشی از مدیریت انسان می‌باشد. البته باتوجه به این که در این رابطه اطلاعاتی در دسترس نیست، با قطعیت نمی‌توان اظهار نظر نمود.

بررسی میزان اهمیت نسبی نمایه‌های خاک در مجموعه حداقل داده‌ها (شکل ۲) نشان می‌دهد که از بین پنج ویژگی انتخاب شده EC خاک بیشترین سهم را در افزایش شاخص کیفیت خاک داشته است. پس از EC محتوی سیلت و ماده آلی خاک در رتبه دوم قرار گرفتند و درصد سنگریزه و واکنش خاک کمترین تاثیر در افزایش کیفیت خاک را داشتند. پایین و مرادی نسب (۱۴۰۰) نیز در مطالعه‌ای که با هدف ارزیابی تناسب اراضی برای کشت کنجد در منطقه انجام دادند، آهک، ماده آلی، pH و سنگریزه را مهمترین عوامل محدودکننده خاکی معرفی کردند (۳۶).

نقشه پهنه‌بندی کیفیت خاک

وضیعت پراکنش مکانی خاک‌های منطقه از نظر کیفیت خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. این نقشه بر اساس شاخص WQI_MDS_NL که به عنوان بهترین رویکرد

جدول (۳) همبستگی بین ویژگی‌های مختلف شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها

Table (3) Correlation between different chemical and physical characteristics of soils

BD	MWD	G	Sa	Si	C	CEC	K	P	N	CCE	OM	EC	pH
												1.00	pH
												1.00	EC
											1.00	.236*	OM
										1.00	-.41**	-.21*	CCE
								1.00	-.480**	.78**	.214*	-.466**	N
							1.00	.59**	-.326**	.457**	0.12	-.253**	P
						1.00	.461**	.522**	-.230*	.429**	.219*	-0.16	K
						1.00	.234*	.383**	.492**	-0.16	.60**	.310*	CEC
					1.00	.61**	.501**	.490**	.75**	-.411**	.79**	.240*	C
				1.00	.241**	0.15	.286**	.241**	0.16	-0.02	.246**	0.08	Si
			1.00	-.88**	-.67**	-.414**	.463**	.424**	.496**	.219*	-.57**	-0.18	Sa
		1.00	.215*	0.08	.318**	-0.13	-.200*	-.257**	-.192*	0.15	.266**	0.05	G
	1.00	-.184	-.311**	0.08	.517**	.308**	.229*	.301**	.525**	-.242**	.451**	.236*	MWD
1.00	0	-.220*	0.14	0.14	0.07	-.397**	-.375**	-.235*	-.233*	-.377**	.306**	-.292**	BD

EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، SAR: نسبت سدیم جذبی، G: سنگریزه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، OM: محتوی ماد

آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش خاک، Sa: شن، Si: سیلت، C: رس، P: فسفر قابل جذب، CCE: کرنات کلسیم معادل

*: معنی داری در سطح ۵ درصد و **: معنی داری در سطح ۱ درصد.

جدول (۴) مولفه های اصلی، مقادیر ویژه، واریانس مشترک و ماتریکس چرخشی
 Table(4) Principal components, eigenvalues, common variance and rotation matrix

مولفه سوم PC3	مولفه دوم PC2	مولفه اول PC1	مولفه های اصلی principal components
آماره ها Statistics			
1.267	2.808	4.352	مقدار ویژه Eigenvalues
12.050	25.059	41.082	درصد واریانس ویژه percentage of variance
78.191	66.141	41.082	درصد واریانس تجمعی cumulative variance
ماتریس چرخشی مولفه ها Rotated Component Matrix			
	-0.117	-	<u>-0.708</u> pH
	<u>0.588</u>	0.152	0.462 EC
	-0.165	0.433	<u>0.713</u> OM
	0.185	-	-0.589 CCE
	-0.254	0.338	0.768 N
	-0.384	0.385	0.460 P
	-0.267	0.484	0.354 K
	0.182	0.299	0.673 CEC
	-0.204	0.468	0.738 C
	-	<u>0.936</u>	-0.137 Si
	-	-0.928	-0.258 Sa
	<u>0.686</u>	-0.121	-0.219 G
	-0.102	0.168	0.563 MWD
-	0.103	-0.637	BD

EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، SAR: نسبت سدیم جذبی، G: سنگریزه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، OM: محتوی ماد آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش خاک، Sa: شن، Si: سیلت، C: رس، P: فسفر قابل جذب، CCE: کربنات کلسیم معادل مقادیر برجسته مربوط به ویژگی هایی با بیشترین همبستگی با مولفه مربوطه، و اعداد برجسته زیر خط دار نشان دهنده ویژگی-های انتخاب شده هستند.

بیگدلی و همکاران: ارزیابی و مدل‌سازی کیفیت خاک با...

جدول (۵) وزن اعضای مجموعه داده‌های کل و حداقل
Table (5) Weight of total and minimum dataset members

MDS		TDS		ویژگی
وزن	واریانس مشترک	وزن	واریانس مشترک	Soil property
weight	communalities	weight	communalities	
0.052	.161	0.069	.702	pH
0.237	.727	0.065	.665	EC
0.252	.773	0.074	.758	OM
-	-	0.065	.669	CCE
-	-	0.080	.816	N
-	-	0.058	.592	P
-	-	0.068	.691	K
-	-	0.068	.698	CEC
		0.081	.825	C
0.257	.790	0.093	.949	Si
-	-	0.095	.971	Sa
0.20	.615	0.066	.677	G
-	-	0.060	.613	MWD
-	-	0.050	.514	BD

EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، SAR: نسبت سدیم جذبی، G: سنگریزه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه ها، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، OM: محتوی ماد آلی، N: نیتروژن کل، K: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش خاک، Sa: شن، Si: سیلت، C: رس، P: فسفر قابل جذب، CCE: کربنات کلسیم معادل

جدول (۶) وضعیت کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه بر اساس رویکردهای مختلف
Table (6) Soil quality status of the study area based on different approaches

انحراف از معیار	آمار توصیفی					نوع شاخص	شماره مدل
	خطای استاندارد	میانگین #	حداکثر	حداقل	دامنه		
Standard deviation	Std. error	Ave.	Max.	Min.	Range	Type of index	Number of model
0.04009	0.0037	0.600 ^b	0.7	0.48	0.22	AQI_TDS_L	1
0.05036	0.0046	0.476 ^d	0.61	0.32	0.29	AQI_TDS_NL	2
0.06817	0.0063	0.651 ^a	0.84	0.48	0.36	AQI_MDS_L	3
0.07159	0.0066	0.541 ^c	0.77	0.37	0.39	AQI_MDS_NL	4
0.04194	0.0038	0.597 ^b	0.71	0.49	0.22	WQI_TDS_L	5
0.05229	0.0048	0.469 ^d	0.61	0.32	0.29	WQI_TDS_NL	6
0.07505	0.0069	0.660 ^a	0.87	0.47	0.41	WQI_MDS_L	7
0.08005	0.0074	0.549 ^c	0.81	0.37	0.44	WQI_MDS_NL*	8
0.02593	0.0024	0.399 ^e	0.47	0.32	0.14	NQI_TDS_L	9
0.03317	0.0030	0.313 ^f	0.4	0.21	0.19	NQI_TDS_NL	10
0.04173	0.0038	0.401 ^e	0.51	0.3	0.22	NQI_MDS_L	11
0.04341	0.0040	0.328 ^f	0.46	0.23	0.24	NQI_MDS_NL	12

حروف انگلیسی مشترک به معنی اختلاف غیرمعنی دار و حروف متفاوت به معنی اختلاف معنی دار است.

*: بهترین مدل برای بیان کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص حساسیت.

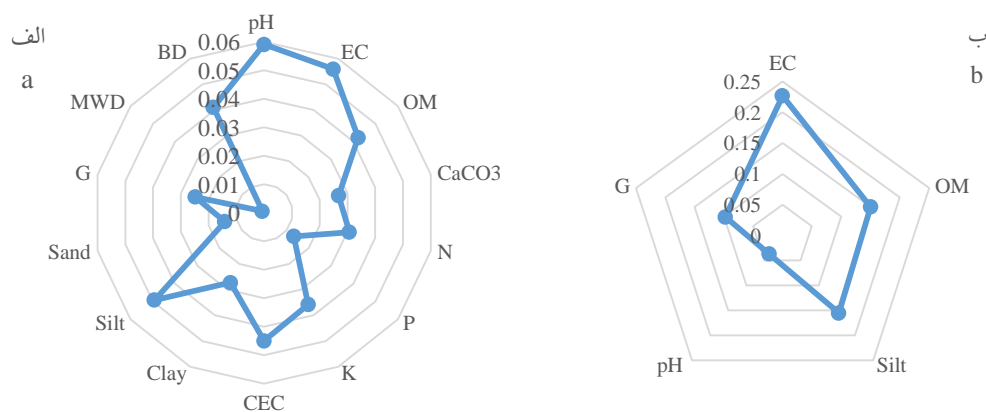
AQI: شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده، WQI: شاخص کیفیت خاک تجمعی وزن دار، NQI: شاخص کیفیت خاک

نمورو، TDS: مجموعه کل داده‌ها، MDS: مجموعه حداقل داده‌ها، N: تابع امتیازدهی خطی، NL: تابع غیرخطی

جدول (۷) همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک
Table (7) Correlation between soil indicators

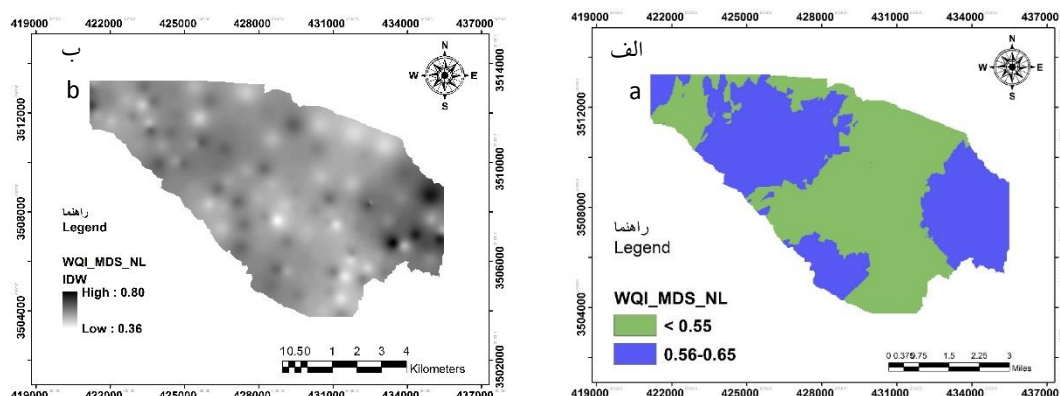
	1#	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AQI_TDS_L	1											
WQI_TDS_L	.987**	1										
NQI_TDS_L	.995**	.983**	1									
AQI_TDS_NL	.760**	.751**	.764**	1								
WQI_TDS_NL	.759**	.766**	.762**	.993**	1							
NQI_TDS_NL	.758**	.748**	.761**	1.000**	.992**	1						
AQI_MDS_L	.608**	.584**	.601**	.662**	.644**	.664**	1					
WQI_MDS_L	.628**	.609**	.626**	.685**	.671**	.687**	.995**	1				
NQI_MDS_L	.594**	.571**	.601**	.671**	.652**	.674**	.989**	.991**	1			
AQI_MDS_NL	.645**	.657**	.650**	.770**	.774**	.771**	.895**	.914**	.902**	1		
WQI_MDS_NL	.664**	.686**	.668**	.778**	.791**	.778**	.869**	.892**	.874**	.995**	1	
NQI_MDS_NL	.643**	.655**	.649**	.770**	.774**	.771**	.896**	.914**	.903**	1.000**	.994**	1

1: AQI_TDS_L, 2: WQI_TDS_L, 3: NQI_TDS_L, 4: AQI_TDS_NL, 5: WQI_TDS_NL, 6: NQI_TDS_NL, 7: AQI_MDS_L, 8: WQI_MDS_L, 9: NQI_MDS_L, 10: AQI_MDS_NL, 11: WQI_MDS_NL, 12: NQI_MDS_NL



شکل (۲) اهمیت نسبی اعضای مجموعه داده‌های کل (الف) و حداقل (ب) در تعیین کیفیت خاک.
Figure(2) The relative importance of (a) total and (b) minimum data set members in determining soil quality.

بیگدلی و همکاران: ارزیابی و مدل‌سازی کیفیت خاک با...



شکل (۳) نقشه طبقه‌بندی شده (الف) و طبقه‌بندی نشده (ب) کیفیت خاک تهیه شده توسط روش درونیابی IDW
Figure (4) Classified (a) and unclassified (b) soil quality maps prepared by the IDW interpolation method.

(WQI_MDS_NL: شاخص کیفیت خاک وزنی محاسبه شده با مجموعه داده حداقل و تابع امتیازدی غیر خطی)

مجموعه حداقل داده‌ها برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه توصیه می‌شود. به طور کلی، خاک‌های منطقه مورد مطالعه از نظری کیفیت در کلاس متوسط قرار دارند. فسفر، آهک، ماده آلی و پایداری ساختمان خاک از محدودکننده‌ترین عوامل در کیفیت خاک‌های منطقه بودند. لذا، توصیه می‌شود برای افزایش کیفیت خاک‌ها از شیوه‌ها و فنونی استفاده شود که باعث بهبودی این ویژگی‌ها گردد.

سپاس‌گزاری

این پژوهش با استفاده از اعتبار پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است (SCU.AS1402.44263) و بدینوسیله نویسندگان مراتب سپاس‌گزاری خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه اعلام می‌دارند.

نتیجه‌گیری

آگاهی از کیفیت خاک‌ها و همچنین عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های آنها در تولید محصولات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج این تحقیق نشان داد که از بین سه شاخص استفاده شده، شاخص کیفیت خاک وزنی WQI در مقایسه با دو شاخص AQI و NQI از توان بالاتری در کمی‌سازی کیفیت خاک‌ها برخوردار بود. علاوه بر این، از بین دو تابع خطی و غیرخطی برای استانداردسازی متغیرها، تابع غیرخطی کارایی بهتری را نشان داد. هرچند که استفاده از مجموعه داده‌های کل توانست کیفیت خاک‌ها را بهتر ارائه دهد اما بین مقادیر کیفیت خاک به دست آمده از مجموعه داده‌های کل و مجموعه داده‌های حداقل همبستگی بالایی وجود داشت و نتایج آنها مشابه بود. لذا، به دلیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه، استفاده از

References

1. Abdel-Fattah, M. K., Mohamed, E. S., Wagdi, E. M., Shahin, S. A., Aldosari, A. A., Lasaponara, R., and Alnaimy, M. A. 2021. Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt. *Sustainability*, 13(4), 1824. DOI: [10.3390/su13041824](https://doi.org/10.3390/su13041824)
2. Abdellatif, M.A., El Baroudy, A.A., Arshad, M., Mahmoud, E.K., Saleh, A.M., Moghanm, F.S., Shaltout, K.H., Eid, E.M. and Shokr, M.S. 2021. A GIS-based approach for the quantitative assessment of soil quality and sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(23), p.13438. <https://doi.org/10.3390/su132313438>
3. Abuzaid, A. S., Mazrou, Y. S., El Baroudy, A. A., Ding, Z., and Shokr, M. S. 2022. Multi-Indicator and geospatial based approaches for assessing variation of land quality in arid agroecosystems. *Sustainability*, 14(10), 5840. <https://doi.org/10.3390/su14105840>
4. Andrews, S. S., Karlen, D. L., and Cambardella, C. A. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
5. Azarneshan, S., khormali, F., sarmadian, F., kiani, F., and Eftekhari, K. 2018. Soil Quality Evaluation of Semi-arid and Arid Lands in Qazvin Plain, Iran. *Water and Soil*, 32(2), 359-374. doi: 10.22067/jsw.v32i2.65408 (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i2.65408>
6. Azlan, A., Aweng, E. R., and Ibrahim, C. O. 2011. The correlation between total organic carbon (TOC), organic matter and water content in soil collected from different land use of Kota Bharu, Kelantan.
7. Bahmani, M., Mohammadi, J., Esfandiyarpoor, E., and Mottaghian, H. 2019. Assessing and Mapping of Integrated and Nemero Soil Quality Indices and their Relationship with Rose Yield (A Case Study: Bardsir, Kerman Province). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(3), 1-23. (In Persian) doi: [10.22069/EJSMS.2020.15608.1838](https://doi.org/10.22069/EJSMS.2020.15608.1838)
8. Bhunia, G. S., Shit, P. K., and Maiti, R. 2018. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001>
9. Bo, Y., Zhu, Q., Bao, Y., Zhao, W., Zhao, Y., and Zhang, H. 2015. A comparative study on three methods of soil quality evaluation of microtopography in the semi-arid Loess Plateau, China. *Journal of Environmental Biology*, 36(1), 325.
10. Bünnemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., De Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P. and Pulleman, M. 2018. Soil quality—A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, pp.105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
11. Csomós, E., Héberger, K., and Simon-Sarkadi, L. 2002. Principal component analysis of biogenic amines and polyphenols in Hungarian wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13), 3768-3774.
12. de Andrade Barbosa, M., de Sousa Ferraz, R. L., Coutinho, E. L. M., Neto, A. M. C., da Silva, M. S., Fernandes, C., and Rigobelo, E. C. 2019. Multivariate analysis and modeling of soil quality indicators in long-term management systems. *Science of the Total Environment*, 657, 457-465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.441>
13. de Paul Obade, V., Lal, R., and Moore, R. 2014. Assessing the accuracy of soil and water quality characterization using remote sensing. *Water resources management*, 28, 5091-5109. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0796-7>
14. Karlen, D.L. and Stott, D.E. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, pp.53-72.

15. El Behairy, R. A., El Arwash, H. M., El Baroudy, A. A., Ibrahim, M. M., Mohamed, E. S., Kucher, D. E., and Shokr, M. S. 2024. How Can Soil Quality Be Accurately and Quickly Studied? A Review. *Agronomy*, 14(8), 1682. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081682>
16. Gorji, M., Kakeh, J., and AliMohammadi, A. 2018. Quantitative soil quality assessment in different land uses at some Parts of south eastern of Qazvin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 941-950. [doi: 10.22059/ijswr.2017.127498.667256](https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.127498.667256)
17. Govaerts, B., Sayre, K. D., and Deckers, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and tillage research*, 87(2), 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.005>
18. Hashemi, M., Gholamalizadeh Ahangar, A., Bameri, A., Sarani, F., and Hejazizadeh, A. 2016. Survey and Zoning of Soil Physical and Chemical Properties Using Geostatistical Methods in GIS (Case Study: Miankangi Region in Sistan). *Water and Soil*, 30(2), 443-458. (In Persian) [doi: 10.22067/jsw.v30i2.25950](https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.25950)
19. Heydari, P., Hojati, S., Enayati, N., and Raiat Pische, A. 2017. Effect of land use change on C stock and some biological characteristics of soils in parts of Rakaat watershed, east of Khuzestan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(1), 181-192. (In Persian) [doi: 10.22092/ijrdr.2017.109859](https://doi.org/10.22092/ijrdr.2017.109859)
20. Jalhoum, M. E., Abdellatif, M. A., Mohamed, E. S., Kucher, D. E., and Shokr, M. 2024. Multivariate analysis and GIS approaches for modeling and mapping soil quality and land suitability in arid zones. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27577>
21. Jilkova, V., and Frouz, J. 2010. Changes in soil chemistry in the surroundings of wood ant (*Formica polyctena*) nests. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.
22. Jolliffe, I. T., and Cadima, J. 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. DOI: [10.1098/rsta.2015.0202](https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202)
23. Kamali, K., Zehtabian, G., Mesbahzadeh, T., Arabkhedri, M., Shohab Arkhazloo, H., and Moghadamnia, A. 2021. Determining the Most Effective Properties to Evaluate Soil Quality of Agriculture Lands in Mohammadshahr Plain of Karaj. *Water and Soil*, 35(2), 251-266. (In Persian). [doi: 10.22067/jsw.2021.15005.0](https://doi.org/10.22067/jsw.2021.15005.0)
24. Karamizadeh, S., Abdullah, S. M., Manaf, A. A., Zamani, M., and Hooman, A. 2013. An overview of principal component analysis. *Journal of Signal and Information Processing*, 4(3), 173-175.
25. Karlen D.L., D.E. Stott, 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality, *Defin. Soil Qual. Sustain. Environ.* 35 53–72.
26. Legaz, B.V., De Souza, D.M., Teixeira, R.F., Antón, A., Putman, B. and Sala, S. 2017. Soil quality, properties, and functions in life cycle assessment: an evaluation of models. *Journal of Cleaner Production*, 140, pp.502-515. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.077>
27. Lenka, N. K., Meena, B. P., Lal, R., Khandagle, A., Lenka, S., and Shirale, A. O. 2022. Comparing four indexing approaches to define soil quality in an intensively cropped region of Northern India. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 865473. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.865473>
28. Li, X., H. Li, L. Yang, Y. Ren, 2018. Assessment of soil quality of croplands in the corn belt of northeast China, *Sustainability* 10 248. <https://doi.org/10.3390/su10010248>

<https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v10y2018i2011p2248-d127552>

29. Liu, Z., Han, J., Sun, Z., Chen, T., Hou, Y., Lei, N., Dong, Q., He, J. and Lu, Y. 2019. Long-term effects of different planting patterns on greenhouse soil micromorphological features in the North China Plain. *Scientific Reports*, 9(1), p.2200. DOI: [10.1038/s41598-019-38499-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-38499-6)
30. Margesin, R., Schinner, F. and Wilke, B.M. 2005. Determination of chemical and physical soil properties.
31. Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., and Patra, A. K. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental monitoring and assessment*, 136, 419-435. DOI: [10.1007/s10661-007-9697-z](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z)
32. Mukherjee, A. and Lal, R. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. *PloS one*, 9(8), p.e105981. doi: [10.1371/journal.pone.0105981](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981)
33. Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., and Davari, M. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.024>
34. Nieder, R., Benbi, D.K. and Reichl, F.X., 2018. Soil quality and human health, in: Nieder, R., Benbi, D.K. and Reichl, F.X. (ed.), *Soil components and human health*, Springer, Netherlands, Dordrecht, , pp. 1–34.
35. Özkan, B., Dengiz, O. and Turan, İ.D. 2020. Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. *Scientific Reports*, 10(1), p.22074. doi: [10.1038/s41598-020-79105-4](https://doi.org/10.1038/s41598-020-79105-4)
36. Papan P., and Moradi Nasab V. 2021. Qualitative assessment of land suitability for sesame in Izeh plain. 17th Iranian Soil Science Congress. 18 October 2021, Alborz, Karaj, Iran.
37. Pawar, A. B., Kumawat, C., Verma, A. K., Meena, R. K., Raza, M. B., Anil, A. S., and Trivedi, V. K. 2017. Threshold limits of soil in relation to various soil functions and crop productivity. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6, 2293-2302. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.256>
38. Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., and Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334. DOI: [10.1016/j.geoderma.2008.12.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015)
39. Ramezani, F., Jafari, S., Salavati, A., and Khalilimoghaddam, B. 2016. Study the Soil Quality Changes Indicators Using Nemoro and Integrated Quality Index Models in Some Khuzestan's Soils. *Water and Soil*, 29(6), 1629-1639. (In Persian) doi: [10.22067/jsw.v29i6.35514](https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.35514).
40. Rocha Junior, P.R., Andrade, F.V., Mendonça, E.S., Donagemma, G.K., Fernandes, R.B.A., Bhattharai, R., Kalita, P.K. 2017. Soil, water, and nutrient losses from management alternatives for degraded pasture in Brazilian Atlantic rainforest biome. *Science of the Total Environment*, 583, 53–63. doi: [10.1016/j.scitotenv.2016.12.187](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.187)
41. Sainju, U. M., and Liptzin, D. 2022. Relating soil chemical properties to other soil properties and dryland crop production. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1005114. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1005114>
42. Samie Khoshk Estalkhi, F., Yaghmaeian Mahabadi, N., Abrishamkesh, S., and Maslahatjou, A. 2024. Evaluation of Scoring and Weighting Methods for Soil Characteristics to Determine Soil Quality in Different Land Uses. *Iranian Journal of Soil Research*, 37(4), 355-375. (In Persian) doi: [10.22092/ijsr.2024.361794.700](https://doi.org/10.22092/ijsr.2024.361794.700)

43. Sarmadian, F., and Taghi zadeh Mehrjerdi, R. 2010. A Comparison of Interpolation Methods for Preparing Soil Quality Maps: Case study: (Agricultural Faculty Experimental Field). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 40(2). (In Persian) [doi: 20.1001.1.2008479.1388.40.2.8.2](https://doi.org/20.1001.1.2008479.1388.40.2.8.2)
44. Selmy, S. A., Al-Aziz, S. H. A., Jiménez-Ballesta, R., García-Navarro, F. J., and Fadl, M. E. 2021. Soil quality assessment using multivariate approaches: a case study of the dakhla oasis arid lands. *Land*, 10(10), 1074. <https://doi.org/10.3390/land10101074>
45. Sepehya, S., Mehta, D., Kumar, A., Sharma, R., Sharma, D., and Sharma, A. 2024. Concept and Assessment Methodology of Soil Quality: A Review. *International Journal of Plant and Soil Science*, 36(5), 164–172. <https://doi.org/10.9734/ijps/2024/v36i54513>
46. Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi Garlidani, A., Hashemi, Nesb Zavareh, K.S., Toloi, R., Beheshti, M., Avizhgan, A., Cheraghi, M. 2024. Methods of Soil Analysis: Sampling, Chemical, and Physical Methods. Soil and Water Research Institute of Iran ISBN: 978-622-6705-36-3. (In Persian)
47. Shohab Arkhazloo, H., Emami, H., Haghnia, G., and Karimi, A. 2011. Determining most important properties for soil quality indices of agriculture and range lands in a some parts of southern Mashhad. *Water and Soil*, 25(5). (In Persian) [doi: 10.22067/jsw.v0i-.11256](https://doi.org/10.22067/jsw.v0i-.11256)
48. Shukla, M. K., Lal, R., and Ebinger, M. 2004. Soil quality indicators for the north Appalachian experimental watersheds in coshocton Ohio. *Soil Science*, 169(3), 195-205. [DOI: 10.1097/01.ss.0000122523.03492.79](https://doi.org/10.1097/01.ss.0000122523.03492.79)
49. Taghipour, M., Yaghmaeian Mahabadi, N., and Shabanpour, M. 2023. Assessment of soil quality indices using multivariate analysis in different land uses (case study: Tootkabon, Guilan province). *Agricultural Engineering*, 46(3), 251-271. (In Persian)
[doi: 10.22055/agen.2023.44957.1684](https://doi.org/10.22055/agen.2023.44957.1684)
50. Tesfahunegn, G. B. 2014. Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014(1), 646502. [DOI: 10.1155/2014/646502](https://doi.org/10.1155/2014/646502)
51. Vasu, D., Singh, S.K., Ray, S.K., Duraisami, V.P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A.M. and Anantwar, S.G. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, pp.70-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>
52. Yaghmaeian Mahabadi, N., Fayyaz, H., Sabouri, A., and Shirinfekr, A. 2021. Comparison of Soil Quality Evaluation Methods and Their Relationships with Tea Yield in West Guilan Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 34(4), 435-450. (In Persian)
[doi: 10.22092/ijsr.2021.351656.551](https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.351656.551)
53. Alidoust, E., Afyuni, M., Hajabbasi, M. A., and Mosaddeghi, M. R. 2019. Application of multivariate statistical methods for evaluating soil quality indices in Lordegan semiarid region. *Applied Soil Research*, 7(3), 192-206. . (In Persian)
54. Zahirnia, A., Matinfar, H., and Bahrami, H. 2020. Investigation of parameters affecting soil quality under saline and semi-saline conditions (case study of south and southwest of Khuzestan province). *Agricultural Engineering*, 43(3), 405-423. (In Persian)
[doi: 10.22055/agen.2020.33820.1569](https://doi.org/10.22055/agen.2020.33820.1569)
55. Zhou, W., Han, G., Liu, M., and Li, X. 2019. Effects of soil pH and texture on soil carbon and nitrogen in soil profiles under different land uses in Mun River Basin, Northeast Thailand. *Peer-reviewed journal*, 7, e7880. [doi: 10.7717/peerj.7880](https://doi.org/10.7717/peerj.7880)