

Evaluating the minimum data set determination to assess saline-sodic soil quality

Hossein Rezazadeh¹, Salar Rezapour^{2*}, Parisa Alamdari³, Mohammad Sadegh Asgari⁴

(Received: March 2025 Accepted: October 2025)

Abstract

Soil quality assessment is very important for studying the condition of all lands. Therefore, numerous methods have been proposed to achieve this objective. However, given the vast amount of data involved, there has long been a need for an approach that can effectively explain the desired outcome using a smaller dataset. The use of minimum data sets (MDS) is one of these methods. In this study, 24 different soil attributes, including physical, chemical, and heavy element properties, were analyzed in 80 soil samples from saline-sodic soils on the margins of Lake Urmia to determine the MDS approach using principal component analysis (PCA). The results revealed that eight indicators had eigenvalues greater than one. These indicators, identified as the MDS, were soil electrical conductivity, organic carbon, total Pb, bulk density, silt and clay, total Cd, and calcium carbonate equivalent, and together they accounted for over 78% of the total variance. Among the eight indicators, Pb and Cd had the lowest weights, suggesting the least influence on the soil quality index. Conversely, organic carbon and clay had the highest weights, highlighting their key role in determining the soil quality index for the study region. The coefficients of determination (R^2) between the TDS and MDS datasets were 0.54 for the linear model and 0.64 for the nonlinear model, indicating that the MDS can reliably replace the TDS for soil quality assessment. Additionally, the higher R^2 value of the nonlinear model suggests its greater efficiency in evaluating soil quality in the study area.

Keywords: Saline-Soil Soil, Heavy Metals, Soil Quality Index, Total Data Set, Minimum Data Set, Principal component analysis

Rezazadeh H., Rezapour S., Alamdari P. Asgari M.S., 2025. Evaluating the minimum data set determination to assess saline-sodic soil. Quality. *Applied Soil Research*. 14(2): 74-88.

1- PHD student Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran

2- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran.

3- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

4- Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

* Corresponding Author Email: S.rezapour@urmia.ac.ir

ارزیابی تعیین مجموعه حداقل داده‌ها برای بررسی کیفیت خاک‌های شور - سدیمی

حسین رضازاده^۱، سالار رضاپور^{۲*}، پریسا علمداری^۳، محمدصادق عسگری^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷

چکیده

ارزیابی کیفیت خاک برای بررسی قابلیت تولیدی اراضی حائز اهمیت است. لذا در جهت نیل به این هدف روش‌های گوناگونی پیشنهاد گردیده است. لکن بدلیل تعدد زیاد داده‌ها، وجود روشی که بتواند با بررسی تعداد داده کمتر هدف مورد نظر را تبیین نماید، از دیرباز مطرح بوده است. استفاده از حداقل مجموعه داده‌ها (MDS) یکی از روش‌های فوق است. در این تحقیق ۲۴ ویژگی مختلف شامل فیزیکی، شیمیایی و فلزهای سنگین متعلق به ۸۰ نمونه خاک از اراضی شور - سدیمی حاشیه دریاچه ارومیه جهت تعیین مجموعه حداقل داده‌ها توسط روش تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که ۸ ویژگی دارای ارزش ویژه بیش از یک بودند. این ویژگی‌ها که بعنوان مجموعه حداقل داده انتخاب شدند، شامل هدایت الکتریکی، کربن آلی، سرب کل، جرم مخصوص ظاهری، درصد سیلت و رس، کادمیم کل و کربنات کلسیم معادل بودند و بیش از ۷۸ درصد از واریانس کل را تشریح کردند. از میان این شاخص‌ها کمترین وزن مربوط به سرب و کادمیم بود که بیان کننده تاثیر کمتر عناصر فوق در تعیین شاخص کیفیت خاک و بالاترین وزن نیز مربوط به کربن آلی و درصد رس بود که نشان دهنده تاثیر بالای آنها در تعیین شاخص کیفیت خاک محدوده مورد پژوهش است. ضریب تبیین بین دو مجموعه داده‌های TDS و MDS برای مدل‌های خطی و غیرخطی ۰/۵۴ و ۰/۶۴ بود که بیانگر قابل اطمینان بودن استفاده از مجموعه داده‌های حداقل به جای مجموعه کل داده‌ها و کارایی بهتر مدل غیرخطی برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه بود.

واژه‌های کلیدی: خاک شور-سدیمی، عناصر سنگین، شاخص کیفیت خاک، مجموعه کل داده‌ها، مجموعه حداقل داده‌ها، تجزیه مولفه‌های اصلی

رضازاده ح.، رضاپور س.، علمداری پ.، عسگری م.ص.، ۱۴۰۴. ارزیابی تعیین مجموعه حداقل داده‌ها برای بررسی کیفیت خاک‌های شور - سدیمی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۴، شماره ۲. صفحه: ۷۴-۸۸

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ایران.

۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۴- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

* پست الکترونیک: S.rezapour@urmia.ac.ir

مقدمه

خاک جزء بسیار مهم و پایدار زیست بوم است که برای نیل به توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی، مطالعه آن الزامی است. با این وجود پیچیدگی‌های موجود در خاک به طور جدی اطلاعات ما را در چگونگی کارکردهای آن محدود کرده است (Karlen et al., 2004). خاک وظایف یا کارکردهای مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی تولید محصول، ذخیره کربن، نگهداری آب، چرخه عناصر غذایی و تصفیه آب اشاره کرد. از اینرو بسته به هدف استفاده از خاک، می‌توان کیفیت آن را مورد توجه قرار داد. در طی چند دهه اخیر تعاریف زیادی برای کیفیت خاک ارائه شده که در بیشتر آنها، تأکید اصلی بر توانایی خاک در انجام وظایف مورد نظر است (Doran & parkin, 1994). کیفیت خاک بیانگر ظرفیت نوع مشخصی از خاک، برای کاربرد آن در زیست بوم طبیعی یا مدیریت شده برای تولیدات پایدار گیاهی و حیوانی، حفظ یا ارتقاء کیفیت آب و هوا و حمایت از سلامت انسان است (Karlen et al., 1997). شاخص کیفیت مطلوب خاک، شاخصی است که بیانگر حداقل یک عملکرد خاک بوده، به مدیریت خاک حساس و به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد (Armenise et al., 2013, Barrios et al., 2006). دوران و پارکین (Doran & Parkin, 1994) معتقدند کیفیت خاک عبارت است از ظرفیت خاک به صورت تابعی از محدودیت‌های اکوسیستم و کاربری اراضی به منظور حفظ باروری زیستی و کیفیت زیست محیطی، همراه با افزایش رشد گیاه، حیوان و سلامت انسان. ارزیابی کیفیت خاک از طریق اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های خاک که به عنوان شاخصهای کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شوند، صورت می‌پذیرد (Mohammadi et al., 2005). محاسبه شاخص کیفیت خاک که قسمت اصلی ارزیابی کیفیت خاک است، معمولاً بر مبنای ارزیابی تجمعی مشخصه‌های مهم کیفیت و وزن‌های آنها صورت می‌گیرد (Sun et al., 2003). مطالعات مختلف ارزیابی کیفیت خاک بر مبنای مجموعه کل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (TDS^1) انجام شده است (Karlen et al., 1998). با این وجود انتخاب یک مجموعه

حداقل از ویژگی‌ها (MDS^2) بر اساس بیشترین همبستگی با مجموعه TDS می‌تواند کارایی بیشتری داشته باشد (Goverts et al., 2006). در مطالعات تعیین کیفیت خاک هر کدام از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما همیشه یک مجموعه کامل از داده‌ها در تجزیه و تحلیل‌ها به کار نمی‌رود، زیرا زمانی که تعداد زیادی متغیر را اندازه می‌گیریم، علاوه بر اینکه یکسری مشکلات عملی به وجود می‌آید، تعداد روابط نیز بیش از حد تصور خواهد بود. لذا نیاز به تکنیک‌هایی است که تعداد داده‌ها را کاهش دهد (Emami et al., 2012). تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA^3) از جمله این روش‌ها است. هدف اصلی این روش کاهش تعداد متغیرها به یک مجموعه کوچکتر است، به نحوی که این مجموعه کوچک بیشتر تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کند و اطلاعات موجود در متغیرها نیز حفظ شود (Jiang & Telen, 2004). تجزیه به مؤلفه‌های اصلی توسط محققان مختلف در توصیف تغییرپذیری ویژگی‌های خاک به کار رفته است. یائو و همکاران (Yao et al., 2012) با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی تغییرپذیری مکانی ۱۷ ویژگی خاک را مورد بررسی قرار دادند و از بین آنها پنج ویژگی کلر، سدیم، پتاسیم، قابلیت هدایت الکتریکی و مواد آلی را به عنوان مهمترین شاخص‌های مؤثر بر کیفیت خاک در اراضی کشاورزی مناطق شور کشور چین اعلام کردند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2017) کیفیت خاک را بر مبنای روش‌های مختلف خطی و غیرخطی در دو دسته مجموعه کل داده‌ها (TDS) و دسته حداقل داده‌ها (MDS) بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در دو مدل شاخص کیفیت تجمعی و نمره روش خطی از روش غیرخطی مناسب‌تر بود. گرجی و همکاران (Gorji et al., 2017) شاخص‌ها و روش‌های انتخاب ویژگی‌های مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک توسط مدل‌های متفاوت را در کاربری‌های مختلف مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که کاربری‌های باغ و مرتع به ترتیب بیشترین مقدار شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره را داشتند؛ اما کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده دارای کمترین کیفیت خاک بودند و تفاوت معنی داری

مهاباد، روضه، شهرچایی، باراندوز و نازلوچایی قرار دارند. طول و عرض جغرافیایی مکان‌های نمونه‌برداری با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) تعیین گردید. جهت انجام نمونه‌برداری در هر مکان به صورت شعاعی یک نقطه مرکزی و پنج نقطه در اطراف نقطه مرکزی نمونه‌برداری در نظر گرفته شد. سپس جهت حصول نمونه مرکب، نمونه‌های جمع‌آوری شده از شش نقطه برداشتی با هم بصورت همگن مخلوط شدند و به آزمایشگاه منتقل یافتند. پس از انتقال، نمونه‌ها هوا خشک شده و از الک دو میلیمتری عبور داده شدند و نهایتاً تحت آزمایش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی قرار گرفتند.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک تحت آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder 1986)، pH در گل اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (McLean, 1982)، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه فلزی (Blake & Hartage, 1986)، کربن آلی به روش والکی-بالک (Walkley & Black, 1982)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنثی سازی با اسید و پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم (Page et al., 1982)، کربنات کلسیم فعال به روش اگزالات آمونیوم (Leopart & Suarez, 1996)، فسفر قابل جذب به وسیله عصاره‌گیری با بی‌کربنات سدیم (Olsen, 1982)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Burt, 2004) تعیین شدند. شکل کل عناصر کم مصرف و سنگین خاک شامل آهن، منگنز، روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (Dahnke & Journal, 1990) عصاره‌گیری شدند و غلظت آنها نیز توسط دستگاه جذب اتمی شیمادزو اندازه‌گیری شد. ترکیب یونی خاک در عصاره اشباع خاک و ظرفیت قابل تبادل خاک همراه با سدیم قابل تبادل توسط استات آمونیوم نرمال تعیین شدند و سپس با استفاده از غلظت کلسیم، منیزیم و سدیم محلول و تبدالی شاخص‌های نسبت سدیم جذبی (SAR) و درصد سدیم تبدالی (ESP) خاک (Swift & Sparks, 1996) در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند. فاکتور K یا فرسایش پذیری خاک توسط مدل ویلیامز (Williams et al., 1984) محاسبه شد و

با دو کاربری باغ و مرتع داشتند. ضریب تبیین بین دو مجموعه داده‌ها برای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره بیانگر قابل اطمینان بودن استفاده از MDS به جای TDS و همچنین کارایی بهتر شاخص کیفیت تجمعی برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه بود. در مطالعات قبلی ارزیابی شاخص کیفیت خاک برای اهداف مختلف به طور قابل توجهی انجام شده، اما بررسی شاخص کیفیت خاک و فاکتورهای تأثیرگذار بر آن در خاک‌های شور و سدیمی که بخش وسیعی از خاک‌های ایران و سایر نقاط جهان را تشکیل می‌دهد انجام نشده است. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از روش حداقل داده‌ها این کار انجام پذیرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین طول‌های $45^{\circ}21'$ تا $46^{\circ}12'$ شرقی و عرض‌های $53^{\circ}36'$ تا $34^{\circ}37'$ شمالی و با وسعت 120 هزار هکتار در بخش جنوبی دریاچه ارومیه در استان آذربایجان غربی قرار دارد (شکل ۱). اشکال اراضی موجود در منطقه از تیپ اراضی پست است. کاربری اراضی عمدتاً بایر بوده و این منطقه تنوع قابل توجهی از لحاظ زهکشی، فرآیندهای خاکساز و فعالیت انسانی برخوردار است. اکثر خاک‌های این منطقه به طور طبیعی تحت تأثیر شوری و سدیمی دریاچه ارومیه هستند. خاک‌های این منطقه به دلیل ارزش‌های زیست‌محیطی، اکولوژیکی، اقتصادی و نقش حیاتی در زندگی انسان، از اهمیت بالایی برخوردارند و پس از رفع محدودیت‌ها، پتانسیل کشاورزی مطلوبی نیز پیدا می‌کنند. اما اثر ترکیبی عوامل انسانی و طبیعی و غفلت از آن‌ها، این منابع ارزشمند را در معرض تهدید و تخریب جدی قرار می‌دهد (Amirpour, 2015).

عملیات میدانی و نمونه برداری خاک

در فصل تابستان مرحله عملیات میدانی و نمونه برداری (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) از خاک‌های شور و سدیمی بخش جنوبی دریاچه ارومیه بصورت شبکه بندی نامنظم انجام شد. مکان‌های نمونه برداری در محدوده اراضی حوضه رودخانه‌های زرینه رود، سیمینه رود، رودخانه‌های گذار،

تعریف می‌شود که با استفاده از آن، مقادیر ویژگی مورد نظر بین صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره دهی گردید. در این روش ویژگی‌های کیفیت خاک به سه دسته ۱- هر چه بیشتر بهتر (ویژگی‌هایی که افزایش آنها موجب بهبود کیفیت خاک می‌گردد مانند کربن آلی)، ۲- هر چه کمتر بهتر (ویژگی‌هایی که افزایش آنها موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد مانند جرم مخصوص ظاهری) و ۳- تابع سطح بهینه (در مورد ویژگی‌هایی از خاک است که افزایش یا کاهش آنها تا حد معینی موجب بهبود کیفیت خاک شده و افزایش یا کاهش آنها بیش از حد بهینه موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد مانند pH خاک) تقسیم شدند (Masto et al., 2008). نحوه محاسبه امتیاز هر ویژگی خاک به شرح زیر است. (۳) تابع هرچه بیشتر بهتر

$$SL = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$$

(۴) تابع هرچه کمتر بهتر

$$SL = (X_{max} - X_i) / (X_{max} - X_{min})$$

در این معادلات SL امتیاز معیارها، X_i مقدار اندازه‌گیری شده برای هر معیار، X_{max} مقدار حداکثر متغیر خاک و X_{min} مقدار حداقل متغیر خاک می‌باشند. در توابع امتیازدهی غیرخطی از منحنی سیگموئیدی برای نرمال سازی و نمره‌دهی ویژگی‌های خاک به‌صورت زیر استفاده شد (Andrews et al., 2004).

$$NSL = \frac{a}{1 + (X/X_m)^b} \quad (5)$$

که در آن NLS نشان دهنده نمره غیرخطی هر ویژگی در دامنه صفر تا یک است؛ a حداکثر مقدار نمره هر ویژگی که برابر یک است؛ X مقدار هر ویژگی خاک اندازه‌گیری شده و X_m مقدار میانگین هر ویژگی خاک است. b شیب معادله است که برای توابع "بیشتر بهتر" و "کمتر بهتر" به ترتیب برابر ۲.۵- و ۲.۵+ بود (Masto et al., 2008).

شاخص پایداری خاک (SSI) به همراه نسبت رس اصلاح شده (MCR) نیز توسط معادلات زیر تعیین شد (Pieri, 2012; Olaniya et al., 2020).

$$SSI = \frac{1.72 \times \%SOC}{\%Clay + \%Silt} \times 100 \quad (1)$$

$$MCR = \frac{\%Sand + \%Silt}{\%Clay + \%SOM} \quad (2)$$

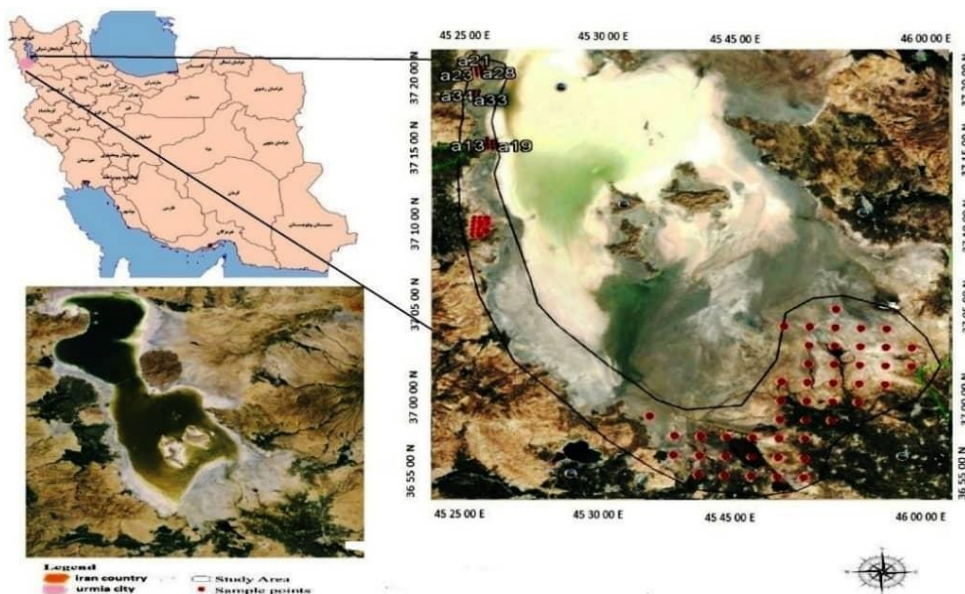
در معادلات بالا SOC و SOM به ترتیب درصد کربن آلی و مواد آلی خاک را نشان می‌دهند.

شاخص‌های کیفیت خاک

در این تحقیق برای محاسبه شاخص کیفیت خاک ۲۴ ویژگی مختلف خاک (توزیع اندازه ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری، pH، کربن آلی، CEC، کربنات کلسیم معادل، کربنات کلسیم فعال، ESP، SAR، EC، ازت کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب، فاکتور فرسایش پذیری خاک، SSI، نسبت رس اصلاح شده، فلزهای سنگین آهن، مس، کادمیم، روی، سرب، نیکل و منگنز) به عنوان مجموعه کل داده‌ها و در مرحله بعد حداقل داده‌ها بوسیله روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مشخص شدند. روش PCA از میان کل ویژگی‌های مورد بررسی خاک، ویژگی‌هایی که بیشترین تاثیر را بر کیفیت خاک منطقه دارند انتخاب می‌کند به این صورت که داده‌ها را در چندین مؤلفه (PC) دسته‌بندی نموده و فقط مؤلفه‌هایی که ارزش ویژه بالاتر از یک داشتند برای قرار گرفتن در دسته حداقل داده‌ها انتخاب شدند (Qi et al., 2009). هر یک از مؤلفه‌ها، ویژگی‌هایی که دارای کمتر از ۱۰ درصد اختلاف با بیشترین مقدار وزن موجود در هر ویژگی بود، برای دسته حداقل داده‌ها گزینش شدند. در نهایت شاخص کیفیت خاک از طریق مجموعه حداقل داده‌ها محاسبه شدند.

امتیازدهی ویژگی‌های خاک

برای محاسبه شاخص کیفیت خاک لازم است ویژگی‌های خاک امتیازدهی شوند. با توجه به آن که واحد فیزیکی ویژگی‌های مورد بررسی متفاوت هستند، برای ارائه آنها در قالب یک مقدار کلی واحد سنجش حذف شده که برای این منظور از توابع امتیازدهی استاندارد عضویت فازی استفاده شد (Liu et al., 2014). در این روش برای هر ویژگی خاک، تابعی



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه برداری (استان آذربایجان غربی، ۱۴۰۱)

Figure 1. Location of study area and sampling points

ویژگی مورد نظر است. نهایتاً برای هر نمونه خاک، ۴ مدل کلی کیفیت خاک شامل SQI-MDS، SQI-TDS، خطی (L) و غیرخطی (NL) محاسبه شد (Sun et al., 2003).

تحلیل های آماری

برای تعیین رابطه بین ویژگی‌های خاک و کیفیت پویای خاک در منطقه و در واقع مدل سازی و ایجاد معادله خطی که بتوان از آن برای پیش بینی کیفیت خاک استفاده کرد، از آزمون تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA) استفاده شد. جهت نیل به این هدف از نرم افزارهای "SPSS, Excell" بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

مشخصات کیفی عمومی خاک‌های محدوده پژوهش

در جدول ۱ برخی ویژگی هایی آماری مرتبط به داده‌های این پژوهش ارائه شده است. شاخص‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه از پراکنش قابل توجهی برخوردار بودند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود توزیع اندازه ذرات سه گانه به گونه‌ای است که باعث ایجاد تنوع قابل توجهی از کلاس بافت

وزن دهی پارامترها

وزن ویژگی‌های خاک با استفاده از محاسبه واریانس مشترک صورت گرفت که با استفاده از روش آماری تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به دست آمد. در این روش نسبت مقدار سهم اشتراک پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک پذیری کل ویژگی‌ها، به عنوان وزن هر ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد (Sun et al., 2003).

محاسبه شاخص کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک (SQI) براساس مجموع حاصل ضرب امتیاز هر ویژگی خاک در وزن آن برای مدلهای خطی و غیر خطی به ترتیب بصورت رابطه ۶ و ۷ زیر محاسبه شد.

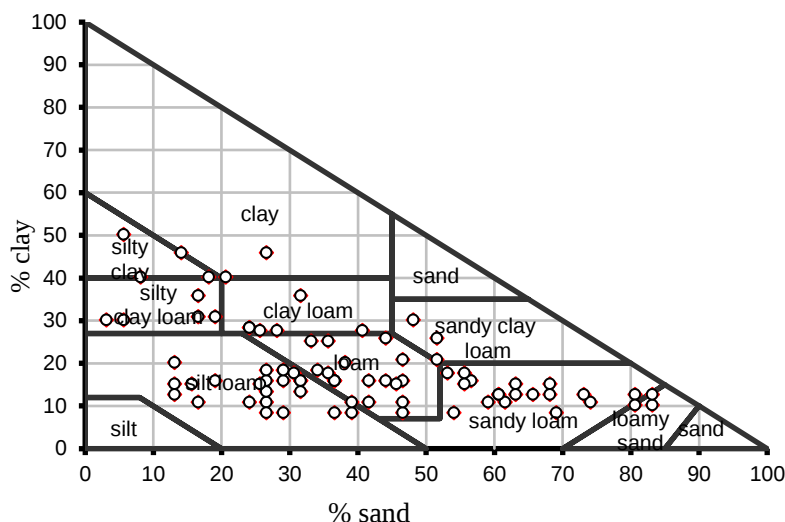
$$SQI-L = \sum_{i=1}^n W_i \times SL_i \quad (6)$$

$$SQI-NL = \sum_{i=1}^n W_i \times NSL_i \quad (7)$$

که در آن W_i وزن تعلق یافته به هر ویژگی خاک، و SL_i به همراه NSL_i نیز مقدار نمره تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد

و نسبت جذبی سدیم (SAR) به ترتیب در دامنه ۶-۱۵۹ دسی زیمنس بر متر و ۳۴-۱۶۸ متغیر بود. همچنین میزان ESP خاک‌ها نیز در محدوده ۳۲-۱۰۱ درصد بودند (جدول شماره ۱). این دامنه تغییرات شاخص‌های شوری و سدیمی خاک (pH, SAR, EC, ESP) نشان می‌دهد که خاک‌های مورد مطالعه از تیپ خاک‌های شور-سدیمی بودند (Brady & weil, 2016).

خاک شده و عمده این منطقه شامل کلاس بافتی لوم، لوم شنی و لوم سیلتی هستند. جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها در دامنه ۱/۴۲-۱/۵۲ و میانگین ۱/۴۵ گرم در سانتیمتر مکعب قرار داشت که نشان می‌دهد اکثر خاک‌های منطقه از لحاظ این ویژگی در کلاس متوسط (۱/۳-۱/۶) قرار دارند. در همین حال میزان pH خاک‌ها نیز بین ۷/۱-۸/۵ متغیر بوده که نشان‌دهنده ویژگی‌های قلیایی در این خاک‌ها بود. مقدار EC



شکل ۲- پراکنش کلاس بافت خاک‌های مورد مطالعه

Figure 2. Textural class distribution of the investigated soils

ضعیف برای فسفر و کلاس متوسط برای پتاسیم خاک بود (Havlin *et al.*, 2005). دامنه غلظت فلزهای سنگین خاک‌ها که شناسه مهمی از کیفیت و سلامت خاک هستند، بصورت ۲۰/۲ تا ۱۱۴/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم برای روی، ۱۳/۲ تا ۳۶/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم برای مس، ۰/۳۳ تا ۳/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم برای کادمیم، ۱۲/۱ تا ۳۲ میلی‌گرم در کیلوگرم برای سرب و ۲۹/۵ تا ۹۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بودند. با این وجود بر اساس استانداردهای بین المللی (Kabata & Pendias, 2010; Dheows, 2020) غلظت عناصر فوق در همه نمونه‌ها کمتر از حد قابل آنها بود. با توجه به ضریب تغییرات، عناصر مس و نیکل از پراکنش متوسطی ($16\% < CV \leq 36\%$) برخوردار بودند، در حالی‌که عنصر روی، کادمیم و سرب

در مورد شاخص SSI^4 و MCR^5 که شاخص‌های مرتبط با تخریب خاک هستند، به ترتیب در دامنه ۰/۶۵ تا ۴/۹۸ و ۱/۳۳ تا ۸/۷۴ قرار داشتند. این نتایج نشان‌دهنده حساسیت زیاد خاک‌های مورد مطالعه به فرسایش و تخریب خاک است (Pieri *et al.*, 1995). درصد کربن آلی و ازت کل به ترتیب در دامنه ۰/۰۴ تا ۰/۱۶ و ۰/۲ تا ۰/۹۴ درصد متغیر بود که نشان‌دهنده محدوده ضعیف برای هر دوی این پارامترها است. میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌ها ۱۶ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بود که محدوده کلاس متوسطی ($12 < CEC < 25$) را نشان می‌دهد (Hazelton & Murphy, 2016). میانگین فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک‌ها به ترتیب ۶/۹ و ۱۶۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود و بیانگر یک کلاس

4. Soil stability index
5. Modified clay ratio

تغییرات زیادی ($CV > 36\%$) را نشان دادند (Wilding, 1985)

جدول ۱- توصیف آماری متغیرهای خاک

Table 1. statistical characteristics of the main soil properties in the study area

	Unit	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	CV
Sand	%	3.15	83.15	38.896	19.78	50.85
Silt	%	4.15	74.15	41.944	16.87	40.22
Clay	%	8.4	50.2	19.16	9.79	51.1
BD	g/cm ³	1.42	1.52	1.45	0.02	1.38
pH		7.14	8.54	7.6	0.31	4.08
EC	dS/m	6	159	66.075	56.36	85.3
SOC	%	0.2	0.94	0.545	0.14	25.69
CaCO ₃	%	5.5	35	13.921	6.42	46.12
ACC	%	1.52	3.23	2.049	0.36	17.57
CEC	cmol/kg	11.69	29.77	16.562	4.07	24.57
Total N	%	0.04	0.16	0.09	0.02	22.22
P	mg/kg	4.25	62	6.901	6.28	91
K	mg/kg	130.83	208.17	165.402	19.49	11.78
SAR		34.12	168.83	103.805	43.14	41.56
ESP	%	32.91	101.89	63.624	13.32	20.94
MCR	%	1.33	8.74	3.673	1.72	46.83
SSI	%	0.65	4.98	1.767	0.91	51.5
Cd	mg/kg	0.327	3.243	1.801	0.75	41.64
Cu	mg/kg	13.15	36.825	22.067	5.85	26.51
Pb	mg/kg	12.104	31.988	18.161	4.06	22.36
Zn	mg/kg	20.266	114.375	52.765	23.46	44.46
Ni	mg/kg	29.45	96.425	39.606	10.55	26.64
Fe	mg/kg	19075	22400	20884.439	715.54	3.43
Mn	mg/kg	306	770.5	435.543	85.47	19.62

علائم استفاده شده عبارتند از: Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، pH: سیدیته خاک، EC: هدایت الکتریکی، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل کل، ACC: آهک فعال، SOC: کربن آلی خاک، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، K: پتاسیم قابل جذب، P: فسفر قابل جذب، N: نیتروژن کل، SAR: نسبت جذب سدیم، ESP: درصد سدیم تبدلی، BD: جرم مخصوص ظاهری، MCR: نسبت رس اصلاح شده SSI: شاخص پایداری خاک، Cd: کادمیوم، Cu: مس، Pb: سرب، Zn: روی، Ni: نیکل، Fe: آهن، Mn: منگنز.

The abbreviations used are as follows: Clay, Silt, Sand, pH (soil acidity), EC (electrical conductivity), CaCO₃ (total equivalent calcium carbonate), ACC (active lime), SOC (soil organic carbon), CEC (cation exchange capacity), K (available potassium), P (available phosphorus), N (total nitrogen), SAR (sodium adsorption ratio), ESP (exchangeable sodium percentage), BD (bulk density), MCR (modified clay ratio), SSI (soil stability index), Cd (cadmium), Cu (copper), Pb (lead), Zn (zinc), Ni (nickel), Fe (iron), and Mn (manganese).

مخصوص ظاهری، pH، کربن آلی، CEC، کربنات کلسیم معادل، کربنات کلسیم فعال، EC، SAR، ESP، ازت کل و فسفر و پتاسیم قابل جذب، SSI، نسبت رس اصلاح شده، فلزهای سنگین آهن، مس، کادمیوم، روی، سرب، نیکل و

انتخاب مؤلفه‌های اصلی کیفیت خاک

در این پژوهش ۲۴ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک به عنوان مجموعه کل داده‌ها (TDS) انتخاب و اندازه‌گیری شدند. پارامترهای مورد بررسی شامل توزیع اندازه ذرات خاک، جرم

منگنز بودند. جهت انتخاب مجموعه حداقل داده‌ها همه ویژگی‌های خاک‌ها تحت آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی قرار گرفتند و مؤلفه‌های اصلی (PC) تعیین شدند (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه
Table 2. Results of Principal Component Analysis (PCA) for the studied soil properties

PC	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Eigenvalue	5.024	3.586	2.39	1.944	1.858	1.513	1.435	1.039
Variance (%)	20.935	14.941	9.958	8.099	7.741	6.303	5.981	4.33
Cumulative Variance (%)	20.935	35.876	45.834	53.933	61.674	67.977	73.958	78.288
Loading								
Sand	-0.878	-0.043	-0.433	-0.027	-0.092	-0.044	0.038	-0.038
Silt	<u>0.953</u>	0.124	-0.055	0	0.133	0.038	-0.054	0.038
Clay	0.132	-0.126	<u>0.971</u>	0.055	-0.043	0.023	0.016	0.011
BD	-0.151	0.017	-0.043	0.149	0.128	0.23	<u>0.746</u>	-0.165
pH	-0.344	-0.122	-0.04	-0.432	-0.177	0.228	-0.425	-0.274
EC	0.318	<u>0.767</u>	-0.194	-0.301	0.068	0.044	0.242	-0.005
SOC	0.063	0.056	-0.068	0.013	<u>0.975</u>	-0.032	0.028	-0.056
CaCO ₃	-0.012	-0.2	0.049	<u>0.938</u>	-0.054	-0.008	-0.002	0.055
ACC	-0.013	-0.201	0.049	0.938	-0.055	-0.006	-0.002	0.053
CEC	0.2	-0.104	0.963	0.064	-0.035	0.023	0.009	-0.005
Total N	0.023	0.078	-0.03	-0.072	0.974	0.015	0.045	-0.021
P	0.045	-0.009	0.074	-0.165	-0.067	-0.198	0.668	0.132
K	-0.044	0.183	0.082	0.322	0.045	-0.222	-0.099	-0.256
SAR	0.381	0.735	-0.222	-0.279	0.078	0.04	0.298	-0.105
ESP	0.408	0.629	-0.252	-0.239	0.072	0.083	0.258	-0.189
MCR	0.648	0.197	-0.635	-0.096	0.152	0.04	-0.037	0.042
SSI	-0.78	-0.105	-0.345	-0.019	0.38	-0.083	-0.064	-0.117
Cd	0.05	-0.024	0.004	0.131	-0.084	0.073	-0.026	<u>0.684</u>
Cu	-0.151	0.396	0.082	-0.086	-0.118	0.615	-0.145	0.142
Pb	0.01	0	-0.065	0.006	-0.002	<u>0.745</u>	0.015	0.306
Zn	0.122	0.474	-0.057	-0.186	0.131	0.426	0.013	0.523
Ni	0.018	-0.51	0.244	-0.156	-0.008	0.184	0.218	0.392
Fe	0.084	-0.785	-0.049	0	-0.044	0.045	0.21	-0.132
Mn	0.289	-0.242	0.109	-0.048	0.049	0.721	0.033	-0.22

مقادیر برجسته شده نشان دهنده ویژگی‌های انتخابی برای مجموعه حداقل داده‌ها هستند.

هفتم جرم مخصوص ظاهری و فسفر قابل جذب و در مولفه هشتم کادمیوم دارای بالاترین ارزش ویژه بودند. از آنجا که بیش از یک ویژگی در برخی مؤلفه‌ها ارزش ویژه بالا داشتند، همبستگی بین این شاخص‌ها بررسی و ویژگی‌های دارای بیشترین ضریب واریانس در هر کدام از مؤلفه‌ها انتخاب و در دسته حداقل داده‌ها قرار گرفتند. در نهایت تعداد هشت ویژگی شامل کادمیوم، کربنات کلسیم معادل کل، رس، سرب، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، سیلت و EC به عنوان

همانگونه که مشاهده می‌شود، هشت ویژگی بیش از ۷۸ درصد از واریانس را تبیین می‌کنند و لذا در مرحله بعد بایستی ویژگی‌های با وزن و بار عاملی بالا انتخاب تا مجموعه (MDS) تشکیل و تعداد ویژگی‌ها کاهش یابد. در مولفه‌های هشت گانه به ترتیب در مولفه اول ویژگی‌های sand و silt، در مولفه دوم SAR، Fe و EC، در مولفه سوم clay و CEC، در مولفه چهارم، کربنات کلسیم معادل کل و کربنات کلسیم فعال، در مولفه پنجم کربن آلی و ازت کل، در مولفه ششم سرب، در مولفه

(2013). به منظور بررسی شاخص‌های کمی کیفیت خاک در مناطق نیمه خشک چین با استفاده از روش PCA، از بین ۱۳ ویژگی مورد مطالعه تنها سه ویژگی نسبت نیتروژن به فسفر و دو شکل مختلف کربن آلی را به عنوان مجموعه MDS انتخاب کردند.

مجموعه حداقل داده‌ها انتخاب شدند. کارلن و آندرس (Karlen & Andrews 2001) معتقدند در صورتی که حداقل پنج پارامتر در MDS وجود داشته باشد، شاخص کیفیت خاک می‌تواند به طور قابل قبولی براساس حداقل مجموع متغیرها مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد. یو و همکاران (Yao et al.,)

جدول ۳- واریانس مشترک و وزن هر ویژگی خاک در روش‌های TDS و MDS

Table 3. Community and weighting of each soil indicator in the TDS and MDS approaches

	TDS (weight)	community	MDS (weight)
Sand	0.0519	0.975	
Silt	0.0506	0.95	0.1448
Clay	0.0522	0.981	0.1495
BD	0.0373	0.7	0.1067
pH	0.0352	0.661	
EC	0.0469	0.882	0.1344
SOC	0.0515	0.967	0.1473
CaCO ₃	0.0494	0.929	0.1416
ACC	0.0494	0.929	
CEC	0.0524	0.984	
Total N	0.0513	0.964	
P	0.0289	0.543	
K	0.0145	0.273	
SAR	0.0490	0.92	
ESP	0.0424	0.797	
MCR	0.0478	0.899	
SSI	0.0483	0.908	
Cd	0.0267	0.501	0.0763
Cu	0.0334	0.627	
Pb	0.0348	0.653	0.0995
Zn	0.0399	0.749	
Ni	0.0308	0.579	
Fe	0.0368	0.692	
Mn	0.0387	0.727	

این تأثیر کمتر می‌شود. در مجموعه داده‌های MDS ویژگی کادمیم و سرب دارای کمترین وزن می‌باشند و در مقابل درصد رس و کربن آلی نیز دارای بالاترین وزن بودند. در ارتباط با مجموعه داده‌های TDS کمترین وزن مربوط به پتاسیم و فسفر قابل جذب و بالاترین وزن نیز مربوط به درصد ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، درصد سیلت، شن و رس است. در بین شاخص‌های مورد بررسی بطور مشترک رس و مواد آلی در هر مجموعه کل و حداقل داده‌ها دارای وزن نسبتاً

در جدول ۳ مقدار واریانس مشترک هر ویژگی که حاصل تجزیه عاملی بوده و وزن تعیین شده آن عامل در مجموعه کل داده‌ها (TDS) و حداقل داده‌ها (MDS) ارائه شده است. به عقیده گاورتز و همکاران (Goverts et al., 2006)، میزان تأثیرگذاری هر ویژگی در مدل‌های کیفیت خاک به وزن اختصاص یافته به آن ویژگی بستگی دارد. به عبارتی ویژگی‌های دارای وزن بالاتر در مجموعه TDS یا MDS دارای تأثیر بیشتر بر مدل کیفیت خاک بوده و با کاهش وزن آن،

همین رابطه شوکلا و همکاران (Shukla et al 2004)، مواد آلی و میانگین وزنی خاکدانه‌ها را به عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها برای بررسی کیفیت خاک تحت شرایط مختلف پیشنهاد کردند. گاورتز و همکاران (Goverts et al 2006) نیز مواد آلی را به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های حداقل داده جهت مطالعه کیفیت خاک معرفی نمودند.

معادله نهایی شاخص کیفیت خاک بر اساس مجموعه حداقل داده‌ها بر اساس روش‌های خطی (معادله ۸) و غیرخطی (معادله ۹) به شرح زیر محاسبه شدند که می‌توانند برای محاسبه شاخص کیفیت خاک‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرند. روش خطی (معادله ۸):

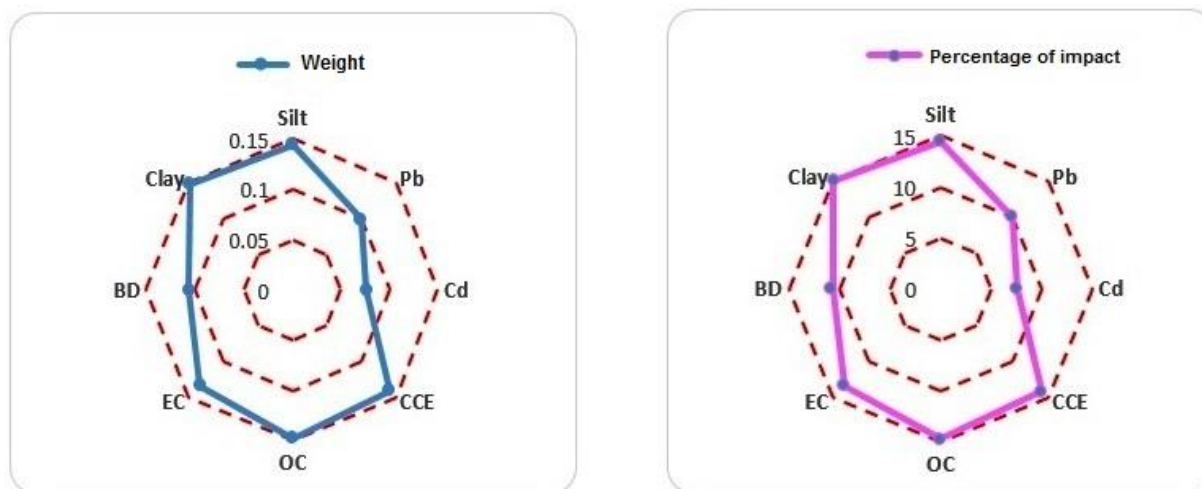
$$SQI - L = 0.134 \left(\frac{6}{EC} \right) + 0.149 \left(\frac{Clay}{50.2} \right) + 0.147 \left(\frac{SOC}{0.94} \right) + 0.145 \left(\frac{4.15}{Silt} \right) + 0.142 \left(\frac{5.5}{CaCO3} \right) + 0.108 \left(\frac{1.42}{BD} \right) + 0.099 \left(\frac{12.104}{Pb} \right) + 0.076 \left(\frac{0.327}{Cd} \right) \quad (8)$$

$$SQI - NL = \left[0.134 \left(\frac{1}{(1 + EC/66.07)} \right)^{2.5} \right] + \left[0.149 \left(\frac{1}{(1 + Clay/19.16)} \right)^{-2.5} \right] + \left[0.147 \left(\frac{1}{(1 + SOC/0.545)} \right)^{-2.5} \right] + \left[0.145 \left(\frac{1}{(1 + Silt/41.94)} \right)^{2.5} \right] + \left[0.142 \left(\frac{1}{(1 + CaCO3/13.92)} \right)^{2.5} \right] + \left[0.108 \left(\frac{1}{(1 + BD/1.45)} \right)^{2.5} \right] + \left[0.099 \left(\frac{1}{(1 + Pb/18.16)} \right)^{2.5} \right] + \left[0.076 \left(\frac{1}{(1 + Cd/1.8)} \right)^{2.5} \right] \quad (9)$$

که ترکیبی از ویژگی‌های فیزیکی (رس، سیلت، و جرم مخصوص ظاهری)، شیمیایی (کربن آلی، شوری و کربنات کلسیم) و با تاثیر کمتری آلاینده‌های فلزی (سرب و کادمیم) شاخص کیفیت خاک مرتبط با MDS را تحت تاثیر قرار دادند.

بالایی بودند. این دو شاخص تاثیر بسیار زیادی بر مجموعه از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک دارند (Nouri et al., 2021). بای و همکاران (Bi et al., 2013) معتقدند یکی از مهمترین محدودیت‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، پائین بودن مقدار ماده آلی آنها است. پایین بودن ماده آلی خاک سبب کاهش سطح حاصلخیزی و کیفیت آنها را به دنبال دارد. کربن آلی خاک به خاطر اثرات تعیین کننده بر ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاک مانند چرخه عناصر غذایی، رشد ریشه گیاه، تهویه و آبگذری خاک، پایداری خاکدانه‌ها و فعالیت میکروارگانیسم‌ها نقش تعیین کننده‌ای بر پایداری کیفیت خاک، تولید محصول و کیفیت محیط زیست دارد (Rezapour et al, 2021).

در شکل ۳ وزن و درصد تاثیر هر یک از شاخص‌های هشت گانه مجموعه حداقل داده‌ها بر شاخص کیفیت خاک نشان داده شده است که تاثیر آنها در توالی $Clay > SOC > Silt > CCE > EC > BD > Pb > Cd$ بود. این داده‌ها نشان می‌دهند

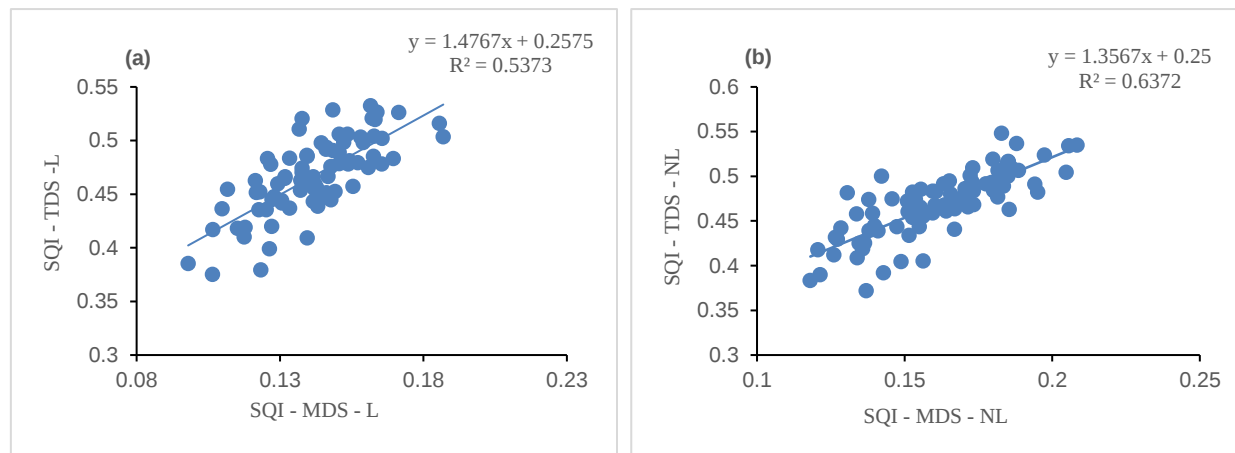


شکل ۳- وزن پارامترهای مجموعه حداقل داده‌ها و درصد تاثیر آنها بر شاخص کیفیت خاک

Figure 3. Weighting of the MDS parameters and their percentage contribution on the soil quality index

اطمینان بیش از ۶۳ درصد می‌تواند جایگزین رویکرد TDS برای محاسبه شاخص کیفیت خاک شود. بنابراین به جای استفاده از مجموعه کل خصوصیات با ۲۴ پارامتر می‌توان از روش MDS با ۸ پارامتر استفاده کرد که نتیجه آن صرفه جویی ۶۰ درصدی در وقت و هزینه‌های انجام کار است. کارایی بهتر مدل‌های غیر خطی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک نسبت به مدل‌های خطی در سایر مطالعات نیز گزارش شده، اگرچه محاسبات عمیق و پیچیده‌تر است (Rezapor et al., 2012; Kafe et al., 2024)

در شکل ۴ همبستگی بین مدل‌های مختلف شاخص کیفیت خاک نشان داده شده است که از لحاظ آماری معنی دار است. همانطور که می‌بینیم بین مدل‌های SQI-TDS-L و SQI-MDS-L میزان همبستگی دارای ضریب تبیین بیش از ۵۳٪ است و بین شاخص‌های مدل SQI-TDS-NL و SQI-MDS-NL میزان همبستگی دارای ضریب تبیین بیش از ۶۳٪ درصد است. بنابراین در هر دو مدل می‌توان از روش MDS به عنوان جایگزین مدل TDS استفاده نمود. با این وجود همبستگی بین مدل‌های SQI-TDS-NL و SQI-MDS-NL از اعتبار بیشتری برخوردار است و در این مدل رویکرد MDS با درصد



شکل ۴- رابطه بین مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها بر اساس مدل‌های خطی و غیر خطی

Figure 4. Relationship between the TDS and MDS approaches based on linear and nonlinear models

در این تحقیق شاخص‌های کیفی خاک اراضی شور - سدیمی حاشیه دریاچه ارومیه برای تعیین مجموعه حداقل داده‌های موثر بر شاخص کیفیت خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از ۲۴ ویژگی مختلف خاک، شاخص کیفیت خاک توسط رویکرد TDS و MDS و بر اساس مدل‌های خطی و غیرخطی محاسبه شد. نتایج نشان دهنده یک ضریب تغییرات بالای ۳۵ درصد برای اکثر شاخص‌های خاک بود که بیانگر یک تغییرات قابل توجه در ویژگی‌های اراضی مورد مطالعه به تبعیت از خواص ذاتی و محیطی اراضی فوق است. از بین این ویژگی‌ها درصد سیلت (PC1)، شوری (PC2)، درصد رس (PC3)، کربنات کلسیم معادل (PC4)، کربن آلی (PC5)، عنصر سرب (PC6)، جرم مخصوص ظاهری (PC7) و عنصر کادمیم (PC8) دارای ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک بودند و به عنوان MDS اراضی مورد مطالعه انتخاب شدند. در مجموعه حداقل داده‌ها، درصد رس و کربن آلی دارای بیش‌ترین وزن و تأثیر بر مدل شاخص کیفیت خاک ناشی از محاسبه MDS بودند. در مقابل عناصر سرب و کادمیم کمترین وزن و تأثیر را بر شاخص فوق داشتند. رابطه مابین دو مجموعه TDS و MDS معنی دار و ضریب تبیین بین آنها برای مدل‌های خطی و غیرخطی به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۶۴ بود که نشان دهنده قابل اطمینان بودن جایگزینی مجموعه داده‌های حداقل به جای مجموعه کل داده‌ها و کارایی بهتر مدل غیرخطی نسبت به مدل خطی برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه است. اگرچه نتایج این مطالعه می‌تواند برای مناطق و خاک‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با استفاده مدل رقومی و خصوصیات بیشتری از خاک، شاخص کیفیت کل اراضی شور - سدیمی منطقه مورد مطالعه قرار گیرد.

نوری و همکاران (Nouri et al., 2021) در مطالعه‌ای که در کن سرخ ایلام انجام دادند، به نتایج مشابهی دست یافتند. ایشان ۱۶ ویژگی را به عنوان داده‌های کل انتخاب نمودند و با روش تجزیه به مولفه‌های اصلی ۸ ویژگی را به عنوان MDS انتخاب نمودند و در نهایت ضریب همبستگی میان TDS و MDS این مطالعه را ۷۹ گزارش کردند. گرجی و همکاران (Gorji et al., 2017) در مطالعه‌ای که در اراضی جنوب شرق قزوین انجام دادند، از میان ۱۷ ویژگی مجموعه کل داده‌ها با استفاده از روش PCA، تعداد ۷ ویژگی را به عنوان مجموعه حداقل داده‌ها انتخاب نمودند.

این محققان ضریب همبستگی بین این دو مجموعه داده‌ها را ۸۸ درصد مشاهده کردند. کفه و همکاران (Kafe et al., 2024) طی مطالعه‌ای در منطقه پیرانشهر، با در نظر گرفتن ۱۸ ویژگی (مجموعه کل داده‌ها) با همین روش ۵ ویژگی را انتخاب و با ضریب همبستگی ۹۰ درصد مجموعه حداقل داده‌ها را مناسب تعیین کیفیت خاک اعلام نمودند. همچنین باریکلو و همکاران (Barikloo et al., 2023) در اراضی جنوب غربی دشت ارومیه ۲۲ ویژگی خاک را به عنوان TDS انتخاب و سپس از میان آنها ۸ ویژگی به عنوان MDS انتخاب نمودند. آنها ضریب همبستگی میان مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها را ۷۳ درصد یافتند. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از روش MDS به عنوان راهکاری قابل اطمینان، سریع و مناسب از نظر اقتصادی برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر خاک می‌تواند مفید باشد.

به طوری که با کاربرد روش MDS اثر تکرارپذیری حاصل از ویژگی‌های با همبستگی مشابه کاهش می‌یابد و اطلاعات موجود در سایر پارامترها را به عنوان مجموعه منتخب می‌توان نشان داد.

نتیجه گیری

Reference

- Amirpour, A., Rezapour, S., & Davalit, B. (2015). The effects of continuous and long-term horticulture operations on the distribution of potassium forms and their absorption properties in Urmia region. *Water and Soil*, 30(4), 1202-1218. (In Persian).
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Armenise, E., Redmile-Gordon, M. A., Stellacci, A. M., Ciccurese, A., & Rubino, P. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130, 91-98.

- Barrios, E., Delve, R. J., Bekunda, M., Mowo, J., Agunda, J., Ramisd, J., Trejo, M. T., & Thomas, R. J. (2006). Indicators of soil quality: A south-south development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*, 135, 248-259.
- Barikloo, A., & Alamdari, P. (2023). Application of Minimal Data Sets for Quantitative Assessment and Investigation of Spatial Autocorrelation of Soil Quality in Southwestern Lands of Urmia Plain. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 27(4), 93-111. (In Farsi).
- Bi, C. J., Chen, Z. L., Wang, J., & Zhou, D. (2013). Quantitative assessment of different planting patterns and soil types. *Pedosphere*, 23(2), 194-204.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils*. Pearson.
- Burt, R. (2004). *Soil survey laboratory methods manual* (Soil Survey Investigations Report No. 42). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Dahnke, W. C., & Joural, G. V. (1990). [Chapter title unknown]. In R. L. Westerma (Ed.), *Agronomy* (Vol. 6, pp. 120-140). Agronomy Inc.
- Deputy of Human Environment Office of Water and Soil (DHEOWS). (2020). *Soil Source Pollution Standards and Guidelines*. (In Persian).
- Doran, J. W., & Parkin, B. T. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran et al. (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment* (pp. 3-21). Soil Science Society of America. (Special Publication No. 35).
- Emami, H., Neyshabouri, M. R., & Shorafa, M. (2012). Relationships between some soil quality indicators in different agricultural soils from Varamin, Iran. *Agriculture Science and Technology*, 14, 951-959. (In Persian with English abstract).
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (Vol. 5, pp. 255-293). American Society of Agronomy.
- Gorji, M., Kakeh, J., & AliMohammadi, A. (2017). Quantitative soil quality assessment in different land uses at some Parts of south eastern of Qazvin. *Iranian Journal of Soil and Water Research (IJSWR)*, 48(5), 941-950. (In Persian with English abstract).
- Govaerts, B., Sayre, K. D., & 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, 163-174.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdal, S. L., & Nelson, W. L. (2005). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (7th ed.). Pearson.
- Hazelton, P., & Murphy, B. (2016). *Interpreting soil test results: What do all the numbers mean?* CSIRO Publishing.
- Jiang, P., & Telen, K. D. (2004). Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north central corn-soybean cropping system. *Agronomy Journal*, 96, 252-258.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press.
- 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.
- Liu, Z., Zhou, W., Shen, J., Li, S., He, P., & Liang, G. (2014). Soil quality assessment of Albic soils with different productivities for eastern China. *Soil and Tillage Research*, 140, 74-81.
- Leoppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
- Mohammadi, J., Khademi, H., & Nael, M. (2005). Study the variability of soil quality in selected ecosystems of Central Zagros. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources (Isfahan University of Technology)*, 9(3), 105-120. (In Persian with English abstract).
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 419-435.

- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (2nd ed., Part 2, pp. 539-579). American Society of Agronomy.
- Olaniya, M., Kumar Bora, P., Das, S., & Chanu, P. H. (2020). Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India). *Scientific Reports*, 10, 14986.
- Olsen, S. K., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis* (2nd ed., Part 2, pp. 403-430). American Society of Agronomy.
- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (Vol. 2). American Society of Agronomy.
- Pieri, C., Dumanski, J., Hamblin, A., & Young, A. (1995). *Land Quality Indicators* (World Bank Discussion Papers No. 315). World Bank.
- Pieri, C. J. (2012). *Fertility of soils: A future for farming in the West African Savannah* (Vol. 10). Springer.
- 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.
- Rezapour, S., Nouri, A., Jalil, H. M., Hawkins, S. A., & Lukas, S. B. (2021). Influence of Treated Wastewater Irrigation on Soil Nutritional-Chemical Attributes Using Soil Quality Index. *Sustainability*, 13, 1952.
- Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2004). Soil quality indicators for the North Appalachian experimental watersheds in Coshocton, Ohio. *Soil Science*, 169, 195-205.
- Sun, B., Zhou, S., & Zhao, Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115(1), 85-99.
- Swift, R. S., & Sparks, D. L. (1996). *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Part 3*. Soil Science Society of America.
- Shahab Arkhazloo, H., Emami, H., & Haghnia, G. H. (2012). Evaluation of the relationship of soil quality models and sustainability indices of agricultural and rangeland soils in south Mashhad. *Iranian Journal of Soil Research (Soil and Water Science)*, 26(3). (In Persian).
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
- Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation accommodation and implication to soil surveys. In D. R. Nielsen & J. Bouma (Eds.), *Soil Spatial Variability* (pp. 166-194). Pudoc.
- Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, 27(1), 129-144.
- 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.