Estimation and Spatial Assessment of Soil Quality and Fertility Using SQI_W and SFI Indices and Geostatistics in the Agricultural Lands of Ardabil, Iran

ABSTRACT

Combining soil physical-hydraulic quality and fertility into a single composite index may mask certain soil limitations. Therefore, their separate spatial assessment is essential for effective agricultural land management. This research aimed to spatially assess soil quality and fertility using the Weighted Soil Quality Index (SQI_W) and Soil Fertility Index (SFI), develop spatial distribution map and site-specific management recommendations for agricultural lands in the Ardabil plain, Iran. A total of 100 soil samples were collected from the 0–30 cm depth across 1,620 ha of wheat–potato cultivated land using a regular grid sampling design. The SQI_W index was calculated based on 10 physical and hydraulic soil parameters, whereas the SFI was derived using 6 chemical and fertility-related parameters. Spatial distributions maps were generated using Kriging interpolation in ArcGIS. The mean values of SQI_W and SFI were 0.54 and 0.49, with ranges of 0.23–0.71 and 0.14–0.76, respectively. Approximately 62% and 61 % of samples were classified as having moderate soil quality and soil fertility, respectively. However, subclassification revealed that 59% and 45% of the sites fell within fragile subclasses of soil quality and fertility, respectively, indicating substantial vulnerability to further degradation. Distinct spatial patterns of SQIw and SFI, together with the absence of a significant correlation between them, highlight the potential masking of soil limitations if the two indices are combined and support their separate assessment. Management strategies should prioritize improving soil organic carbon, adopting of reduced or minimum tillage practices, and implementing soil-test-based nutrient management.

***Keywords**: Spatial variability, kriging interpolation; wheat–potato rotation; site-specific soil management.*

Introduction

The Ardabil plain in northwestern Iran is an important agricultural region for wheat and potato production region, characterized by a semi-arid climate and predominantly calcareous, alkaline soils. Wheat production generally involves relatively less intensive tillage and substantial nitrogen fertilization, whereas potato cultivation typically requires more intensive tillage, frequent field operations, and greater application of phosphorus and potassium fertilizers. These differences, combined with inherent soil variability, may contribute to considerable spatial heterogeneity in soil quality and fertility, emphasizing the need for spatial assessment to identify degraded areas and support site-specific management.

Several integrated indices have been developed for evaluating soil quality and fertility. Among them, the Weighted Soil Quality Index (SQI_W) and Soil Fertility Index (SFI) are widely used to evaluate complementary aspects of soil conditions. Although integrating these indices may simplify overall assessment but can mask variations in individual soil properties and region-specific limitations. Therefore, independent spatial assessment of SQI_W and SFI may provide a more comprehensive understanding of soil conditions and reveal contrasting quality and fertility patterns. This is espacially important for intensively cultivated landscapes, where management practices may differently affect soil health.

Despite the agricultural importance of the Ardabil plain, the spatial distributions of SQI_W and SFI have not yet been comprehensively investigated. This knowledge gap limits the availability of spatial information required for sustainable soil management under wheat–potato cropping systems. Accordingly, this research aimed to evaluate and map soil quality and fertility in the Ardabil plain using the SQI_W and SFI indices. Spatial distribution of SQI_W and SFI were generated using ArcGIS to facilitate the spatial interpretation of soil conditions and provide a practical basis for targeted management interventions.

Methods

This study was conducted across 1620 ha of agricultural land under an intensive wheat-potato rotation system in the Vilkij region of Ardabil province, northern Iran (38°24′–38°28′ N latitude and 48°52′–48°58′ E) . A total of 100 soil samples were collected at a depth of 0–30 cm using a systematic grid-sampling design with a spacing of 500 m × 500 m. Sampling locations were georeferenced using a Garmin 62s GPS receiver. Samples were analyzed for physicochemical and fertility-related properties. Soil particle-size distribution and calcium carbonate equivalent (CCE) were determined using the hydrometer and the back-titration method, respectively. The mean weight diameter (MWD) of soil aggregates was determined by wet sieving. Total nitrogen (N_{tot}) was estimated by calculation, while plant-available- phosphorus (Olsen-P) and potassium (NH_4OAc-K) were determined using 0.5 M $NaHCO_3$ and neutral 1 N ammonium acetate extraction, respectively. Calcium, magnesium and sodium concentraions were also determined in the NH_4OAc extracts. Soil organic carbon (OC)

was measured by wet oxidation. Soil pH and electrical conductivity (EC) were measured in a 1:5 soil-to-water extract using a pH meter and an electrical conductivity meter, respectively. Soluble Na and K were quantified using flame photometry, whereas soluble Ca and Mg were determined by EDTA complexometric titration. Soil bulk density (BD) and hydraulic properties, including hydraulic conductivity (Ks) and available water content (AWC), were calculated using SWC software. The Weighted Soil Quality Index (SQI_W) was calculated using ten physicochemical and hydraulic properties, whereas the Soil Fertility Index (SFI) was derived from six fertility-related soil characteristics. The spatial dependence of the both indices was assessed by semivariogram analysis in GS+ and their distribution maps were generated using ordinary kriging in ArcGIS.

Results

The mean values of SQI_W and SFI were 0.54 and 0.49, respectively, with corresponding ranges of 0.23–0.71 and 0.14–0.76, indicating substantial spatial variability in both soil quality and fertility across the study area. The SQI_W values were classified into five classes: very low (0–0.19), low (0.20–0.39), moderate (0.40–0.59), good (0.60–0.79), and very good (0.80–1.00). The corresponding proportions of the study area within these classes were 0%, 10%, 62%, 28%, and 0%, respectively. Dspite the predominance of moderate soil quality class (62%), subclass analysis revealed considerable vulnerability within the moderate and good quality categories**.** Specifically, 29% of the area classified as having moderate soil quality and 27% of the area classified as having good soil quality were assigned to fragile subclasses. Overall, approximately 56% of the study area, irrespective of its primary soil quality classification, belonged to fragile subclasses. This finding suggests that a substantial proportion of the agricultural land may be vulnerable to further soil quality degradation under continued intensive cultivation, highlighting the importance of implementing appropriate soil management practices, particularly those aimed at preserving and improving soil physical properties**.**

Spatial analysis of the SQI_W distribution map revealed that the northeastern and western parts of the study area were characterized by good soil quality. Approximately 1,004 ha located in the northwestern, central, and southwestern sectors were classified as having moderate soil quality, whereas 162 ha in the southern sector were classified as having low soil quality. Overall, SQI_W values were generally higher in the northeastern and western areas than in the central and southern sectors. This spatial pattern may be associated with the predominance of potato cultivation in the central and southern parts of the study area, where intensive tillage and repeated machinery traffic may contribute to increased soil compaction and adversely affect soil physical conditions.

The SFI spatial distribution map showed that 275 ha in the northern and southeastern parts of the study area were classified as having good soil fertility. Approximately 988 ha (61 %) in the northwestern, central, and western sectors were assigned to the moderate-fertility class, whereas 340 ha in the central, southern, and northwestern sectors were classified as having low soil fertility (21 %). The spatial distribution of SFI indicated more favorable soil fertility conditions in the northern and southeastern areas than in the central, southern, and western sectors. This spatial variability may be associated with the widespread application of chemical fertilizers throughout the region, in the absence of soil-test-based nutrient management, together with low OC contents and potential nutrient imbalances in the central, southern, and western parts of the study area. Furthermore, approximately 45% of the study area was classified within the fragile subclasses of the soil fertility classification, indicating substantial spatial vulnerability to further **s**oil fertility degradation.

Pearson correlation analysis revealed significant positive correlations between SQI_W and AWC ($r = 0.724$), clay content ($r = 0.719$)**,** MWD ($r = 0.715$), and silt content ($r = 0.378$). In contrast, sand content, bulk density (BD), and saturated hydraulic conductivity (Ks) exhibited strong negative correlations with SQIW, with correlation coefficients of −0.952, −0.875, and −0.590, respectively. These relationships highlight the important roles of soil physical and hydraulic properties in determining the spatial variability of soil quality in the study area. In contrast, SFI was strongly and positively correlated with OC, total nitrogen (N), and available potassium (K), with correlation coefficients of 0.893, 0.893, and 0.428, respectively.

Conclusions

Approximately 56 and 45 % of the samples were assigned to fragile soil-quality and soil fertility subclasses, respectively, suggesting a substantial part of the study area is vulnerable to further deterioration under

continued intensive cultivation. Thus, assessment based solely on the dominant quality or fertility class may underestimate the underlying susceptibility of agricultural lands to degradation**.** The spatial patterns of SQI_W and SFI varied considerably across the study area, particularly in the central and southern parts of the study area, where potato cultivation is more intensive. This suggests that soil quality and soil fertility do not necessarily exhibit the same geographic distribution. Areas with relatively favorable fertility conditions may simultaneously exhibit physical or hydraulic limitations, and vice versa. Furthermore, no significant correlation was observed between SQI_W and SFI ($r = 0.028$). Therefore, the independent assessment of SQI_W and SFI can provide a more comprehensive understanding of the spatial variability and distinct limitations of soil quality and fertility across the study area. Management practices should prioritize improving soil structure and maintaining or increasing soil organic carbon (SOC) through the application of organic amendments, including well-managed animal manure and green manure. Crop-residue burning should be avoided; instead, crop residues should be retained or incorporated into the soil where agronomically appropriate. Fertilizer application should be based on soil-test results and regular field monitoring. Conservation-oriented tillage practices, including reduced or minimum tillage and, where agronomically feasible, no-till systems, should be considered to minimize soil disturbance, reduce compaction, and preserve soil structural integrity. Management and remediation efforts should prioritize the central and southern sectors of the study area, particularly **areas** classified within fragile soil-quality and soil-fertility subclasses.

ویرایش استاری نشده

برآورد و تحلیل فضایی کیفیت و حاصلخیزی خاک با استفاده از شاخص‌های SQI_W، SFI و زمین‌آمار در اراضی زراعی دشت اردبیل

چکیده

ادغام کیفیت فیزیکی–هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک در یک شاخص جامع ممکن است به دلیل اثر پوشانندگی برخی محدودیت‌های خاک را پنهان سازد. لذا، ارزیابی جداگانه این مولفه‌ها برای مدیریت بهینه اراضی زراعی ضروری است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جداگانه کیفیت فیزیکی–هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک با استفاده از شاخص‌های تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W) و حاصلخیزی خاک (SFI)، تهیه نقشه پهنه‌بندی و ارائه توصیه‌های مدیریتی مکان محور در اراضی زیر کشت گندم–سیب‌زمینی دشت اردبیل انجام شد. تعداد ۱۰۰ نمونه خاک به مساحت ۱۶۲۰ هکتار از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به روش شبکه‌بندی منظم برداشت وخصوصیات فیزیکوشیمیایی و حاصلخیزی اندازه‌گیری شد. شاخص‌های SQI_W بر پایه ۱۰ پارامتر فیزیکی– هیدرولیکی و SFI بر پایه ۶ پارامتر شیمیایی–حاصلخیزی خاک محاسبه و نقشه آن‌ها به روش کریجینگ در Arc GIS تهیه شد. میزان شاخص SQI_W و SFI به ترتیب دارای میانگین ۰/۵۴ و ۰/۴۹، دامنه ۰/۷۱ – ۰/۲۳ و ۰/۷۶ – ۰/۱۴ و ضریب تغییرات ۱۸/۵۷ و ۲۲/۸۷ درصد بود. به ترتیب ۶۲ و ۶۱ درصد از نمونه‌ها در کلاس متوسط کیفیت و حاصلخیزی خاک قرار داشتند. با این حال، بررسی زیرکلاس‌ها نشانگر قرار گرفتن به ترتیب ۵۹ و ۴۵ درصد از نمونه‌ها در زیرکلاس‌های شکننده SQI_W و SFI بود که بیانگر حساسیت این اراضی به کاهش کیفیت و حاصلخیزی است. واگرایی مکانی نقشه‌ها و عدم همبستگی معنی‌دار بین دو شاخص (r= ۰/۰۲۹)، بیانگر احتمال اثر پوشانندگی محدودیت‌ها و ضرورت ارزیابی جداگانه آن‌ها است. بهبود کربن‌آلی خاک، خاکورزی حداقل و مدیریت تغذیه گیاه بر پایه آزمون خاک برای مدیریت بهینه اراضی توصیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: *تغییرپذیری مکانی، درون‌یابی کریجینگ، تناوب گندم–سیب‌زمینی، مدیریت کل محور خاک*

۱. مقدمه

منابع خاک یکی از ارکان اصلی تولید غذا و امنیت غذایی در کره زمین بوده و در چرخه عناصر غذایی، ترسیب کربن، تنظیم آب و پشتیبانی از حیات نقش اساسی دارد (Lal, 2015). افزایش جمعیت و تقاضا برای مواد غذایی، موجب اعمال فشار حداکثری به منابع طبیعی به ویژه اراضی زراعی شده و کیفیت و حاصلخیزی خاک را تحت تأثیر قرار داده است (FAO and ITPS, 2015). اراضی زراعی مناطق نیمه‌خشک به دلیل استعداد تولید کشاورزی و آسیب‌پذیری در برابر فرسایش خاک، در معرض تخریب در اثر کشاورزی، بهره‌برداری فشرده و مدیریت نامناسب قرار دارند (Lal, 2015). کمبود کربن آلی، محدودیت‌های آب، شوری خاک و ساختمان شکننده از جمله محدودیت‌های خاک‌های این مناطق است. سیستم‌های کشت متوالی و فشرده مانند تناوب گندم–سیب‌زمینی به دلایلی مانند عملیات‌های زراعی سنگین، تردد زیاد ماشین‌آلات، تخلیه عناصر غذایی و مصرف نهاده‌های شیمیایی می‌توانند موجب فشردگی و تخریب خاک شوند (Hamza and Anderson, 2005; Weidhuner et al., 2026; Arvidsson and Håkansson, 2014). پژوهش‌های انجام شده در اراضی زراعی دشت اردبیل وجود برخی از این محدودیت‌ها را تایید کرده است (خان‌زاده و همکاران، ۱۴۰۴؛ لطفی و همکاران، ۱۳۹۲ و معرفتی و همکاران، ۱۴۰۳).

برای ارزیابی کیفیت خاک، شاخص‌های مختلفی مانند شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W)، شاخص نمورو (NQI)، شاخص پایداری خاک (SI) و شاخص رتبه‌بندی تجمعی محدودیت‌ها (CR) ارائه شده است (Andrews et al., 2004; Rahmanipour et al., 2014; Singh & Khera, 2009; Shukla et al., 2004). از میان شاخص‌های فوق، شاخص SQI_W به علت برخورداری از دقت و حساسیت بالاتر در ارزیابی میزان کیفیت خاک به عنوان مدلی مناسب و کارآمد شناخته می‌شود (Andrews et al., 2004). شاخص SQI_W با استفاده از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک مانند جرم مخصوص ظاهری (BD)، بافت خاک و درصد ذرات شن، سیلت و رس، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، آهک، هدایت هیدرولیکی (KS)، آب قابل استفاده گیاه (AWC)، نسبت جذب سدیم (SAR) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) قابل محاسبه و کمی‌سازی است (Bünemann et al., 2018; Awwal et al., 2026).

مطالعات Mukherjee and Lal. (2014) در اوهایو آمریکا نشان داد که از سه روش محاسبه کیفیت خاک (SQI)، روش تجمعی وزنی بالاترین ضریب همبستگی را با عملکرد محصول دارد. برتری روش‌های وزنی مبتنی بر PCA نسبت به روش‌های ساده بررسی شاخص‌های

ویرایش اولیه

ارزیابی کمی کیفیت خاک توسط Askari and Holden. (2014) نیز مورد تاکید قرار گرفت. میرخانی و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم آبی در ۲۰۶ مزرعه دشت تبریز را ارزیابی و بیان کردند که بین شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_a)، کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) و شاخص نمورو (NQI) و عملکرد گندم همبستگی معنی‌دار وجود دارد. با این وجود، مقایسه این سه روش مشخص نمود که شاخص SQI_w به علت اعمال ضرایب اهمیت خصوصیات خاک در ارزیابی و انعکاس محدودیت‌های خاک از دقت بالاتری برخوردار است. در این مطالعه، بر تهیه نقشه پراکنش کیفیت خاک به منظور اتخاذ مدیریت مکان محور در منطقه تاکید شد. شاهپوری و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف ملایر را با استفاده از روش مجموعه حداقل داده‌ها مطالعه و کربنات کلسیم معادل خاک و پتاسیم محلول را به عنوان مهمترین عوامل کنترل کننده کیفیت خاک منطقه با استفاده از PCA معرفی کردند. تاثیر فرسایش خندقی بر شاخص‌های ترکیبی کیفیت خاک در منطقه ملا احمد اردبیل با استفاده از IQI و NQI توسط معرفتی و همکاران (۱۴۰۳) بررسی و نتایج حاکی از کاهش معنی‌دار کیفیت خاک در اثر فرسایش خندقی و قرارگیری خاک‌های منطقه از نظر کیفیت در سطح متوسط تا خوب بود.

حاصلخیزی خاک نقش مهمی در کمیت و کیفیت محصولات زراعی ایفا می‌کند که با استفاده از برخی شاخص‌ها مانند شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) قابل کمی‌سازی و ارزیابی است (Tunçay et al., 2021; Mujiyo et al., 2022; Laribi et al., 2024; Napoleon et al., 2026). این شاخص با استفاده از خصوصیات حاصلخیزی و شیمیایی خاک مانند کربن آلی، عناصر غذایی (نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده و...)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و pH قابل اندازه‌گیری است (Mujiyo et al., 2022). بنابراین، مطالعه شاخص SFI امکان آگاهی از وضعیت کلی یک منطقه از نظر تولید محصول را فراهم می‌کند. در این راستا، Wang et al. 2025 منطقه جیانگسو در چین را با استفاده از شاخص‌های ترکیبی حاصلخیزی خاک ارزیابی و استفاده از شاخص‌های ترکیبی در ارائه تصویر دقیق‌تر از محدودیت‌های حاصلخیزی خاک را یک رویکرد موثر معرفی نمودند. در مطالعه‌ای دیگر، Malo and Saha. 2025 در منطقه‌ای در بنگال هندوستان، شاخص حاصلخیزی خاک را با ادغام خصوصیات فیزیکوشیمیایی و حاصلخیزی خاک ارزیابی و نشان دادند که مطالعه حاصلخیزی خاک در قالب یک شاخص کمی امکان شناسایی دقیق محدودیت‌ها و اعمال کوددهی مکان محور و مدیریت مناسب اراضی را فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای که توسط رحمانی و همکاران (۱۴۰۵) با هدف مدل‌سازی پیش‌بینی پراکنش مکانی شاخص SFI در دو منطقه خشک و نیمه‌خشک استان ایلام انجام شد، خصوصیات فیزیکوشیمیایی در ۲۰۴ نمونه خاک از مناطق دهلران و بدره اندازه‌گیری گردید. نتایج نقشه‌های پهنه‌بندی نشان داد که بیش از ۷۰ درصد هر دو منطقه در کلاس حاصلخیزی زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. در استان اردبیل پژوهش منتشر شده‌ای در زمینه برآورد حاصلخیزی خاک با استفاده از SFI یافت نشد، اما، نتایج بررسی‌های منطقه‌ای در زمینه حاصلخیزی خاک نمایانگر وجود ناهمگونی مکانی در توزیع خصوصیات شیمیایی و حاصلخیزی خاک در منطقه است (خان‌زاده و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌ها به بررسی تنها یکی از شاخص‌های SQI_w و SFI پرداخته‌اند (Nasir et al., 2024; Mujiyo Nariyanti et al., 2022). همچنین، در برخی موارد تمامی پارامترهای مورد بررسی از جمله خصوصیات کیفی خاک (مانند خصوصیات فیزیکی–هیدرولیکی) و عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) در قالب شاخص جامع کیفیت خاک بررسی شده‌اند (Ormanci and Dengiz, 2025). در این صورت، محدودیت‌های منطقه توسط پارامترهای با وزن بالاتر پوشش داده شده و تعدیل می‌شوند (Andrews et al., 2004; Askari and Holden, 2014; Bünemann et al., 2018). به عنوان مثال، در یک تناوب زراعی گندم–سیب‌زمینی ممکن است عناصر غذایی خاک در حد کفایت و کیفیت فیزیکی و هیدرولیکی آن به دلیل عملیات‌های زراعی سنگین و سایر اقدامات لازم برای کشت سیب‌زمینی پایین باشد. در چنین شرایطی، با ترکیب این دو شاخص، نمرات بالای خصوصیات حاصلخیزی خاک موجب تعدیل نمرات پائین خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک شده و اثر پوششی ایجاد خواهد کرد (Bünemann et al., 2018; Andrews et al., 2004; Askari and Holden, 2014). لذا، بررسی جداگانه و همزمان شاخص‌های SQI_w و SFI و تهیه نقشه پهنه‌بندی آنها با بهره‌بردن از سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) امکان ارزیابی بهتر و شناسایی نواحی دارای هم‌خوانی یا واگرایی کیفیت و حاصلخیزی خاک را فراهم خواهد کرد (Andrews et al., 2004).

با توجه به تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک مانند کربن‌آلی، محتوای عناصر غذایی، هدایت هیدرولیکی، pH و EC در محیط خاک به ویژه در اراضی زراعی که معمولا در اثر دخالت‌های انسانی تشدید می‌شود، ارزیابی کیفیت و حاصلخیزی خاک در یک منطقه به صورت

ویرایش اولیه

نقطه‌ای ارزش چندانی نخواهد داشت (Goovaerts, 1997; Webster and Oliver, 2007). لذا، با بهره بردن از روش‌های زمین آماری مانند درون‌یابی کریجینگ و IDW در محیط ArcGIS می‌توان کیفیت و حاصلخیزی خاک را در فواصل بین نقاط نمونه‌برداری شده و مناطق نمونه‌برداری نشده نیز تخمین زد. بنابراین، استفاده تلفیقی از شاخص‌های کیفیت و حاصلخیزی خاک با الگوهای پراکنش مکانی آن‌ها و بهره بردن از زمین‌آمار، روش موثری برای تحلیل فضایی و پراکنش این دو شاخص به منظور مدیریت مکانی کیفیت و حاصلخیزی خاک در مناطق گسترده می‌باشد (Tunçay et al., 2021; Ormanci and Dengiz, 2025).

دشت اردبیل با دارا بودن اقلیم نیمه‌خشک و خاک‌های متأثر از آهک و قلیایی، یکی از اصلی‌ترین مناطق تولید گندم و سیب‌زمینی کشور است. این دو گیاه نیازهای مدیریتی متفاوتی دارند؛ گندم با خاکورزی سطحی و حداقل و مصرف بالای کودهای نیتروژنی و سیب‌زمینی با خاکورزی‌های سنگین و تردد مکرر ماشین‌آلات کشاورزی و مصرف کودهای حاوی فسفر و پتاسیم مدیریت می‌شود. این تفاوت‌های مدیریتی در دراز مدت بین مکانیسم‌ها و فرآیندهای درونی خاک، اختلال و تمایز مکانی ایجاد می‌کند (Rabot et al., 2018; González-Brijo et al., 2025). بررسی منابع نشان می‌دهد که مطالعات منتشر شده‌ای در زمینه ارزیابی جداگانه دو شاخص SQI_W و SFI و پهنه‌بندی آن‌ها با استفاده از زمین آمار در اراضی تحت تناوب کشت فشرده گندم و سیب‌زمینی دشت اردبیل وجود ندارد. بنابراین، این پژوهش با هدف برآورد و تحلیل فضایی کیفیت و حاصلخیزی خاک با استفاده از مدل‌های تفکیک شده SQI_W و SFI و تهیه نقشه پهنه‌بندی آن‌ها با استفاده از نرم افزار ArcGIS و ارائه توصیه‌های مدیریتی مکان محور در اراضی زیرکشت گندم و سیب‌زمینی انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش، در سال ۱۴۰۴ در محدوده ما بین شهر آبی‌بیگلو و سه روستای محمود آباد، آغ‌بلاغ مصطفی‌خان و مرنی از توابع شهرستان نمین انجام شد. مساحت منطقه بر اساس نرم افزار Global Mapper حدود ۱۶۲۰ هکتار بوده و گستره آن بر اساس تصویر جهانی مرکاتور معکوس (UTM، زون ۳۹ شمالی) بین ۴۲۳۵۸۰۰ تا ۴۲۳۹۴۰۰ متر عرض شمالی و ۲۸۳۷۰۰ تا ۲۸۸۲۰۰ متر طول شرقی قرار دارد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتین و آمار ایستگاه هواشناسی نمین، میانگین دمای سالانه ۷ الی ۸/۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه منطقه حدود ۳۵۰ میلی‌متر (اقلیم نیمه خشک) می‌باشد. منطقه دارای توپوگرافی هموار با شیب کمتر از ۲ درصد است. برای تهیه نمونه خاک و انجام تجزیه آزمایشگاهی، از روش شبکه‌بندی منظم با فاصله تقریبی ۵۰۰ متر در ۵۰۰ متر استفاده شد. نمونه‌های خاک با استفاده از بیل و از عمق صفر الی ۳۰ سانتی‌متری تهیه و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده با استفاده از GPS (مدل Garmin 62s) ثبت شد. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها هواخشک و در ظروف پلاستیکی نگهداری شدند.

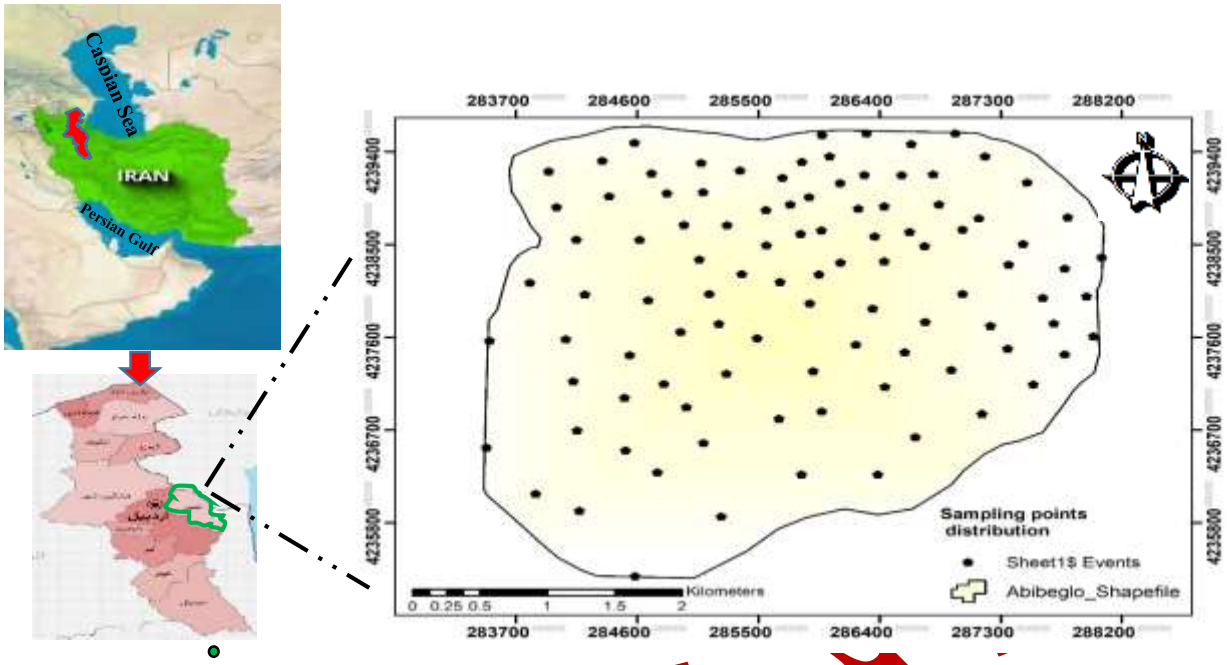
۲،۲. اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکوشیمیایی، حاصلخیزی و هیدرولیکی خاک

فراوانی نسبی ذرات معدنی شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002)، کربنات کلسیم معادل خاک (CCE) به روش تیتراسیون برگشتی (Loeppert and Suarez, 1996)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (Mean Weight Diameter, MWD) توسط الک‌تر (Kemper and Rosenau, 1986) اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری خاک (BD) و خصوصیات هیدرولیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی خاک (Ks) و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه (AWC) با بهره بردن از منحنی مشخصه رطوبتی خاک و نرم افزار SWC (Soil Water Characteristics) محاسبه شد. خصوصیات حاصلخیزی خاک شامل فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه به ترتیب توسط روش اولسن (Olsen et al., 1954) و استات آمونیوم ۱ نرمال خنثی (Hanway and Heidel, 1952) اندازه‌گیری شد. غلظت فسفر در عصاره با استفاده از روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی (Murphy and Riley, 1962) با دستگاه اسپکتروفتومتر و میزان پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فوتومتر تعیین شد. همچنین میزان نیتروژن کل خاک با استفاده از رابطه پیشنهادی Wibowo and Kasno. 2021 (رابطه ۱) محاسبه شد.

$$\text{Total N (\%)} = 0.0805 * \text{OC (\%)} + 0.0198 \qquad R^2 = 0.8098$$

رابطهٔ ۱)

ویراستاری نشده



شکل ۱. موقعیت مکانی و نحوه توزیع نقاط نمونه‌برداری شده در منطقه مورد مطالعه

خصوصیات شیمیایی خاک شامل کربن‌آلی خاک به روش اکسیداسیون‌تر (Walkley and Black, 1934)، هدایت الکتریکی (EC) و واکنش خاک (pH) به ترتیب با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج و pH متر در عصاره ۱:۵ آب به خاک (Richards, 1954) اندازه‌گیری شدند. در عصاره محلول، غلظت سدیم و پتاسیم توسط فلیم فوتومتر و کلسیم و منیزیم به روش تشکیل کمپلکس با EDTA اندازه‌گیری (C_{H2O}) و نسبت جذب سدیم (SAR) طبق رابطه ۲ محاسبه شد. کاتیون‌های قابل استفاده گیاه (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) به روش استات آمونیوم ۱ نرمال خنثی استخراج و اندازه‌گیری شد (C_{NH4OAc}). کاتیون‌های تبادلی از کسر غلظت کاتیون‌های محلول از غلظت کاتیون‌های استخراج شده با استات آمونیوم به واحد سانتی‌مول بار در کیلوگرم خاک محاسبه و ظرفیت تبادل کاتیونی از حاصل‌جمع آن‌ها محاسبه شد (Sumner & Miller, 1996; Richards, 1954).

$$SAR\ (meq/L)^{0.5} = \frac{(Na^{+})}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

رابطهٔ ۲)

که در این رابطه، فعالیت یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم بر حسب meq/L و شاخص نسبت جذب سدیم بر حسب $(meq/L)^{0.5}$ می‌باشد.

۲،۳. محاسبه شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W)

برای محاسبه شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W) از ۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و هیدرولیکی خاک شامل جرم مخصوص ظاهری (BD)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، شن، سیلت و رس، کربنات کلسیم معادل خاک (CCE)، نسبت جذب سدیم (SAR)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، هدایت هیدرولیکی (K_s) و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه (AWC) استفاده شد. معیار انتخاب هر کدام از این ویژگی‌ها برای محاسبه SQI_W، به گونه‌ای بود که پارامتر انتخاب‌شده نمایانگر وضعیت فیزیکوشیمیایی و هیدولیکی خاک بوده و همچنین با پارامترهای انتخاب شده برای شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) مشترک نباشد. به منظور مقایسه کردن ویژگی‌های مختلف خاک و تبدیل مقادیر اندازه‌گیری‌شده به مقیاسی بدون بُعد، از روش نمره‌دهی خطی استفاده شد. در این روش، هر ویژگی خاک با توجه به نوع و جهت تأثیر آن بر عملکرد مورد انتظار شاخص، به نمره‌ای در بازه صفر تا یک تبدیل شد. نمرات بالاتر بیانگر وضعیت مطلوب‌تر آن ویژگی در ارتباط با کیفیت فیزیکی–هیدرولیکی خاک بودند. نوع تابع نمره‌دهی برای هر ویژگی، شامل روابط «بیشتر بهتر است»، «کمتر بهتر است»

مقاله آزاد

و در موارد لازم «دامنه بهینه»، بر اساس ماهیت ویژگی مورد بررسی و حدود بحرانی تعیین شد. حدود پایین و بالای مورد استفاده در نمره‌دهی با توجه به منابع معتبر، شرایط منطقه و بازبینی توزیع داده‌ها تعیین گردید. در ویژگی‌هایی که افزایش مقدار آن‌ها با بهبود وضعیت خاک همراه بود، از تابع افزایشی و در ویژگی‌هایی که افزایش مقدار آن‌ها بیانگر محدودیت یا کاهش مطلوبیت خاک بود، از تابع کاهشی استفاده شد. برای ویژگی‌هایی که دارای دامنه مطلوب مشخص بودند، نمره‌دهی بر اساس فاصله مقدار اندازه‌گیری‌شده از دامنه بهینه انجام گرفت (Andrews et al., 2004; Malo et al., 2022). توابع مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: توابع مورد استفاده در نمره‌دهی ویژگی‌های مورد استفاده در شاخص کیفیت خاک (SQI_W)

ویژگی خاک	نوع تابع	حد پایین	حد بالا	تابع مورد استفاده در نمره‌دهی
شن (٪)	خطی/ دامنه بهینه	۱۵	۷۳	Y=0.0345X-0.52 (sand:15-44), Y=1 (sand=44), Y=-0.0345X+2.52 (sand:44-73)
سیلت (٪)	خطی/ کمتر بهتر	۱۱	۴۸	Y=-0.027x+1.3
رس (٪)	خطی/ دامنه بهینه	۱۰	۵۷	Y=0.043X-0.43 (clay:10-33.5), Y=1 (clay=33.5), Y=-0.043X+2.43 (clay:33.5-57)
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	خطی/ کمتر بهتر	۱/۲۱	۱/۵۵	Y=-2.94X+4.56
میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm)	خطی/ بیشتر بهتر	۱/۳۵	۶/۳۷	Y=0.2X-0.27
هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/hr)	خطی/ بیشتر بهتر	۰/۱۵	۳/۲	Y=0.33X-0.05
ظرفیت آب در دسترس گیاه (cm^3/cm^3)	خطی/ بیشتر بهتر	۰/۰۹	۰/۱۶	Y=14.29X-1.29
هدایت الکتریکی (EC) (dS/m)	خطی/ کمتر بهتر	۰/۰۹	۲	Y=-0.52X+1.05
نسبت جذب سدیم ($(meq/L)^{0.5}$)	خطی/ کمتر بهتر	۰/۲۵	۰/۵۷	Y=-3.12X+1.78
کربنات کلسیم معادل (٪)	خطی/ کمتر بهتر	۴	۸	Y=0.25X+2

X: ویژگی مورد نظر و Y: نمره تعلق یافته به ویژگی در محاسبه SQI_W است. در توابع کمتر بهتر، مقادیر کمتر از حد پایین، نمره ۱ و مقادیر بیشتر از حد بالا، نمره صفر. در توابع بیشتر بهتر، مقادیر کمتر از حد پایین، نمره صفر و مقادیر بیشتر از حد بالا، نمره ۱ می‌گیرند. در توابع دامنه بهینه، مقادیر کمتر از حد پایین و بیشتر از حد بالا نمره صفر می‌گیرند.

با انجام تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای ۱۰ ویژگی فیزیکوشیمیایی و هیدرولیکی، مشاهده شد که تمامی مولفه‌های استخراج شده در ارزیابی ساختار داده‌ها مشارکت داشتند. به منظور تایید مناسب بودن داده‌ها جهت انجام PCA شاخص کفایت اندازه نمونه کایزر–مایر–آلکین (KMO) محاسبه و مقدار آن ۰/۶۴۷ تعیین شد که نشان دهنده مناسب بودن داده‌ها جهت انجام PCA می‌باشد. سه مؤلفه نخست دارای مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک بوده و به‌ترتیب ۴۲/۷۵، ۲۴/۷۱ و ۱۱/۲۶ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند (جدول ۲). در مجموع، این سه مؤلفه قادر به تبیین ۷۸/۷۲ درصد از واریانس کل هستند و مقادیر اشتراکات حاصل از کل مولفه‌ها به‌منظور تعیین ضرایب وزنی پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲. ارزش ویژه بدست آمده از PCA برای شاخص SQI_W

مولفه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
ارزش ویژه	۴/۲۷۵	۲/۴۷۱	۱/۱۲۶	۰/۹۷۲	۰/۶۶۸	۰/۳۷۸	۰/۰۹۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۴	۰
درصد واریانس	۴۲/۷۵	۲۴/۷۱	۱۱/۲۶	۹/۷۲	۶/۶۸	۳/۷۸	۰/۹۱	۰/۱۵	۰/۰۴	۰
درصد واریانس تجمعی	۴۲/۷۵	۶۷/۴۶	۷۸/۷۲	۸۸/۴۵	۹۵/۱۲	۹۸/۹۰	۹۹/۸۱	۹۹/۹۶	۱۰۰	۱۰۰

با توجه به نتایج تحلیل PCA، مقادیر اشتراکات عوامل برای ویژگی‌های مختلف خاک متفاوت بود (جدول ۳). برای محاسبه وزن ویژگی‌ها، اشتراک عامل هر ویژگی بر مجموع اشتراک عوامل تمام ویژگی‌ها تقسیم می‌شود. جرم مخصوص ظاهری با مقدار ۰/۹۸۲، شن با مقدار ۰/۹۷۵ و رس با مقدار ۰/۹۶۶ بیشترین و CCE با مقدار ۰/۰۷۴ کمترین مقادیر اشتراکات (عوامل مستخرج) را به خود اختصاص داد. بر اساس مقادیر اشتراکات استخراج‌شده، وزن نهایی هر پارامتر محاسبه شد. جرم مخصوص ظاهری، شنبه ترتیب با وزن ۰/۱۲۵ و ۰/۱۲۴ و رس و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها هر یک با وزن ۰/۱۲۳، بیشترین سهم را در محاسبه شاخص SQI_W داشتند. در مقابل، CCE با وزن ۰/۰۰۹ کمترین سهم را در این شاخص نشان داد. بنابراین، نتایج حاصل از PCA امکان تخصیص وزن‌های متفاوت به ویژگی‌های

ویرایش اولیه نشده

خاک را بر اساس میزان مشارکت آن‌ها در ساختار تغییرات داده‌ها فراهم کرد و مبنایی کمی برای محاسبه شاخص SQI_W با استفاده از روش تجمع وزنی فراهم آورد. در ادامه، برای وزن‌دهی به هر متغیر از جدول اشتراکات (Communalities) حاصل از تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. در نهایت، SQI_W با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد (میرخانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Mukherjee and Lal, 2014).

$$SQIw = \sum_{I=1}^{n} \mathrm{Wi} \times \mathrm{Si}$$

رابطهٔ۳)

که در این رابطه: S_i نمره خطی تعلق گرفته به هر پارامتر و W_i وزن نهایی هر پارامتر می‌باشد.

جدول ۳. شاخص اشتراک و ارزش وزنی هر یک از پارامترهای شاخص SQI_W حاصل از PCA

پارامتر	شن	سیلت	رس	جرم مخصوص ظاهری	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	هدایت هیدرولیکی اشباع	آب قابل استفاده گیاه	هدایت الکتریکی	نسبت جذب سدیم	کربنات کلسیم معادل
عوامل اولیه	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
اشتراک عوامل	۰/۹۷۵	۰/۹۴۲	۰/۹۶۶	۰/۹۸۲	۰/۹۶۶	۰/۶۶۸	۰/۹۲۰	۰/۶۰۱	۰/۷۷۹	۰/۰۷۴
وزن (Wi)	۰/۱۲۴	۰/۱۲۰	۰/۱۲۳	۰/۱۲۵	۰/۱۲۳	۰/۰۸۵	۰/۱۱۷	۰/۰۷۶	۰/۰۹۹	۰/۰۰۹

Wi= 1.000. SUM Extraction= 7.873.

۴،۲. محاسبه شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)

برای محاسبه شاخص SFI از ۶ خصوصیت مرتبط با حاصلخیزی خاک شامل کربن آلی (OC)، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه استفاده شد. معیار انتخاب هر کدام از این ویژگی‌ها برای محاسبه SFI به گونه‌ای بود که پارامتر مورد انتخاب نمایانگر وضعیت شیمیایی و عرضه عناصر غذایی برای گیاه بوده و با شاخص SQI_W تداخل نداشته باشد. در محاسبه این شاخص از روش نمره‌دهی خطی مشابه شاخص SQI_W استفاده شد که نتایج و توابع آن در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور استانداردسازی مقیاس هر پارامتر در بازه صفر تا ۱ (Tunçay et al., 2021; Laribi et al., 2024) از جدول اشتراکات (Communalities) حاصل از تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA) برای وزن‌دهی به هر متغیر استفاده شد (Mukherjee and Lal, 2014; Tunçay et al., 2021).

جدول ۴: توابع مورد استفاده در نمره‌دهی ویژگی‌های مورد استفاده در شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)

ویژگی خاک	نوع تابع	حد پایین	حد بالا	تابع مورد استفاده در نمره‌دهی
نیتروژن کل (٪)	خطی/ بیشتر بهتر	۰/۰۵	۰/۱۴	Y=1.11X-0.56
فسفر قابل استفاده گیاه (mg/kg)	خطی/ بیشتر بهتر	۵/۲۳	۲۵/۲۷	Y=0.05X-0.26
پتاسیم قابل استفاده گیاه (mg/kg)	خطی/ بیشتر بهتر	۱۵۲	۶۵۴	Y=0.002X-0.303
کربن آلی (٪)	خطی/ بیشتر بهتر	۰/۳۶	۱/۵۴	Y=0.85X-0.305
ظرفیت تبادل کاتیونی ($Cmol_c/kg$)	خطی/ بیشتر بهتر	۱۶	۲۶	Y=0.1X-1.6
pH	خطی/ دامنه بهینه	۷/۵	۸/۴	Y=X-6(pH:6-7), Y=1(pH=7), Y=-0.75X+6.26(pH:7-8.4)

X: ویژگی مورد نظر خاک و Y: نمره تعلق یافته به ویژگی در محاسبه شاخص حاصلیخیزی خاک است. در توابع بیشتر بهتر، مقادیر کمتر از حد پایین، نمره صفر و مقادیر بیشتر از حد بالا، نمره ۱ می‌گیرند. در توابع دامنه بهینه، مقادیر کمتر از حد پایین و بیشتر از حد بالا نمره صفر می‌گیرند.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای شش ویژگی مرتبط با حاصلخیزی خاک نشان داد که دو مؤلفه نخست دارای مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک بوده و به‌ترتیب ۳۵/۳ و ۳۱/۲ درصد از واریانس کل داده‌ها (مجموعا ۶۶/۵ درصد از واریانس کل) را تبیین می‌کنند (جدول ۵). مؤلفه سوم با مقدار ویژه ۰/۸۹۸، حدود ۱۴/۹۷ درصد از واریانس کل را تبیین کرد و سهم تجمعی واریانس تبیین‌شده با احتساب این مؤلفه به ۸۱/۴۷ درصد رسید. مؤلفه‌های چهارم و پنجم به‌ترتیب ۱۰/۶۱و ۷/۹۲ درصد از واریانس کل را تبیین کردند و در مجموع، پنج مؤلفه استخراج‌شده ۱۰۰ درصد از واریانس داده‌ها را پوشش دادند (جدول ۵). با توجه به اینکه تمامی شش ویژگی کلیدی حاصلخیزی خاک به

ویراستاری نشده

منظور حفظ جامعیت اطلاعات خاک در ارزیابی دخالت داشتند، از خروجی‌های تحلیل مولفه‌های اصلی و واریانس تبیین شده توسط مولفه‌ها جهت تعیین ضرایب وزنی پارامترهای مورد بررسی استفاده شد. این موضوع استفاده از PCA را به‌عنوان روشی برای بررسی ساختار تغییرات داده‌ها و تعیین وزن پارامترهای شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) توجیه می‌کند.

جدول۵: ارزش ویژه بدست آمده از PCA برای شاخص SFI

مولفه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
ارزش ویژه	۲/۱۱۸	۱/۸۷۲	۰/۸۹۸	۰/۶۳۶	۰/۴۷۵	۰
درصد واریانس	۳۵/۳	۳۱/۲	۱۴/۹۷	۱۰/۶۱	۷/۹۲	۰
درصد واریانس تجمعی	۳۵/۳۰	۶۶/۵۰	۸۱/۴۷	۹۲/۰۸	۱۰۰	۱۰۰

با توجه به نتایج تحلیل PCA، مقادیر اشتراکات استخراج‌شده برای ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک متفاوت بود (جدول ۶). در نهایت، شاخص SFI با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد (Shi et al., 2018; Laribi et al., 2024).

$$SFI = \sum_{I=1}^{n} \mathrm{Wi} \times \mathrm{Fi}$$

رابطهٔ۴)

که در این رابطه: F_i نمره تعلق گرفته به هر پارامتر و W_i وزن نهایی هر پارامتر می‌باشد.

جدول ۶: شاخص اشتراک و ارزش وزنی هر یک از پارامترهای شاخص SFI حاصل از PCA

پارامتر	نیتروژن کل	فسفر قابل استفاده	پتاسیم قابل استفاده	کربن آلی	ظرفیت تبادل کاتیونی	واکنش خاک (pH)
عوامل اولیه	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
اشتراک عوامل	۰/۹۸۰	۰/۶۰۴	۰/۵۰۴	۰/۹۸۲	۰/۶۸۴	۰/۲۳۶
وزن (Wi)	۰/۲۴۴	۰/۱۵۱	۰/۱۲۶	۰/۲۴۶	۰/۱۷۱	۰/۰۵۹

SUM Wi= ۱/۰۰۰ ،SUM Extraction= ۳/۹۹۰

۵,۲. تجزیه‌های آماری و تهیه نقشه پراکنش

آمار توصیفی پارامترهای مورد بررسی شامل بیشینه، کمینه، میانگین، ضریب تغییرات (CV) و انحراف معیار (SD) با استفاده از نرم‌افزار SPSS و Excel محاسبه شد. توزیع نرمال آماری شاخص SQI_w و شاخص SFI با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. با توجه به نتایج این آزمون، توزیع داده‌های SQI_w (Sig=۰/۰۴۳) و SFI (Sig=۰/۱۴۴) نرمال تشخیص داده شد. برای محاسبه نیم‌تغییرنماها و انجام درون‌یابی کریجینگ از نرم‌افزار GS+ نسخه ۹,۱ استفاده شد. نقشه پهنه‌بندی مکانی شاخص‌های تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_w) و حاصلخیزی خاک (SFI) با استفاده از مدل‌سازی نیم‌تغییرنما و درون‌یابی کریجینگ در سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) ترسیم شد.

۳. نتایج و بحث

۱,۳. آمار توصیفی

آمار توصیفی شاخص SQI_w و SFI به همراه پارامترهای مورد بررسی در جدول ۷ ارائه شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، ظرفیت آب قابل استفاده گیاه (AWC)، جرم مخصوص ظاهری (BD)، واکنش خاک (pH) به ترتیب با ضریب تغییرات ۱۱/۵۸، ۱۱/۰۳، ۴/۳۸ و ۱/۷۴ درصد، تغییرپذیری کمی داشته و تا حدی دارای ثبات نسبی می‌باشند. در مقابل، هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) با ضریب تغییرات ۹۹/۱۶ درصد در بین پارامترهای مورد بررسی بیشترین میزان تغییرپذیری را به خود اختصاص داد. زراعت سیب‌زمینی نیازمند خاکورزی‌های سنگین و عملیات‌های زراعی مداوم از آماده‌سازی اولیه زمین تا مراحل کاشت، داشت و برداشت و حتی عملیات‌های زراعی پس از برداشت مانند جمع آوری بقایای گیاهی و نوار تیپ و... می‌باشد. به نظر می‌رسد در کشت تناوبی گندم و سیب‌زمینی، در مناطقی که

ویرایشی شده

بیشتر زیرکشت سیب‌زمینی بوده‌اند، نسبت منافذ درشت به منافذ ریز در مقایسه با زمین‌هایی با کشت غالب گندم، بیشتر دچار تغییر شده و این امر باعث تفاوت هدایت هیدرولیکی و تغییرپذیری بالای آن شده است. کربن‌آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر اولسن، پتاسیم قابل استفاده گیاه، رس و شن به ترتیب با ضریب تغییرات ۲۱/۸۶، ۱۶/۹۲، ۳۱/۷۵، ۳۴/۵۱، ۲۷/۴۹ و ۲۷/۵۸ درصد، تغییرپذیری متوسطی در این منطقه دارند. میانگین فسفر و پتاسیم قابل استفاده گیاه به ترتیب برابر ۱۳/۶۰ و ۳۶۹/۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آمد که نزدیک حد مطلوب (۱۵ برای فسفر و ۳۵۰ برای سیب‌زمینی) بوده و نیازمند توجه بیشتر در مدیریت مصرف کودهای حاوی این عناصر است.

جدول ۷. آمار توصیفی پارامترهای مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

ویژگی	واحد	میانگین	انحراف معیار	ضریب	بیشینه	کمینه
شاخص کیفیت فیزیکی و هیدرولیکی	-	۰/۵۴	۰/۱۰	۱۸/۵۷	۰/۷۱	۰/۲۳
شاخص حاصلخیزی خاک	-	۰/۴۹	۰/۱۱	۲۲/۸۷	۰/۷۶	۰/۱۴
نیتروژن کل خاک	%	۰/۱۰	۰/۰۲	۱۶/۹۲	۰/۱۴	۰/۰۵
فسفر قابل استفاده گیاه	mg/kg	۱۳/۶۰	۴/۳۲	۳۱/۷۵	۲۵/۲۷	۵/۲۳
پتاسیم قابل استفاده گیاه	mg/kg	۳۶۹/۸۰	۱۲۷/۶۳	۳۴/۵۱	۶۵۴/۴۳	۱۵۲/۱۸
کربن آلی	%	۱/۰۰	۰/۲۲	۲۱/۸۶	۱/۵۴	۰/۳۶
ظرفیت تبادل کاتیونی	$Cmol_c/kg$	۲۱/۱۲	۲/۴۵	۱۱/۵۸	۲۶/۳۷	۱۶/۰۰
واکنش خاک ($pH_{1:5}$)	-	۸/۰۱	۰/۱۴	۱/۷۴	۸/۳۳	۷/۵۹
شن	%	۳۶/۱۲	۹/۹۶	۲۷/۵۸	۷۳/۳۰	۱۵/۶۷
سیلت	%	۳۱/۶۸	۸/۲۵	۲۶/۰۴	۴۷/۸۹	۱۱/۴۴
رس	%	۳۲/۲۰	۸/۸۵	۲۷/۴۹	۵۶/۹۸	۱۰/۳۶
جرم مخصوص ظاهری	g/cm^3	۱/۳۴	۰/۰۶	۴/۳۸	۱/۵۵	۱/۲۱
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	mm	۳/۷۲	۰/۹۹	۲۶/۵۳	۶/۳۸	۱/۳۵
هدایت هیدرولیکی اشباع	cm/h	۰/۴۵	۰/۴۴	۹۹/۱۶	۳/۲۰	۰/۱۵
آب قابل استفاده گیاه	cm^3/cm^3	۰/۱۳	۰/۰۱	۱۱/۰۳	۰/۱۶	۰/۰۹
هدایت الکتریکی ($EC_{1:5}$)	dS/m	۰/۲۰	۰/۰۵	۲۴/۸۳	۰/۳۴	۰/۰۹
نسبت جذب سدیم	$(meq/L)^{0.5}$	۰/۳۴	۰/۰۵	۱۵/۰۹	۰/۵۷	۰/۲۶
کربنات کلسیم معادل	%	۶/۱۶	۰/۸۵	۱۳/۷۲	۸/۱۰	۳/۹۲

۲،۳. شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W)

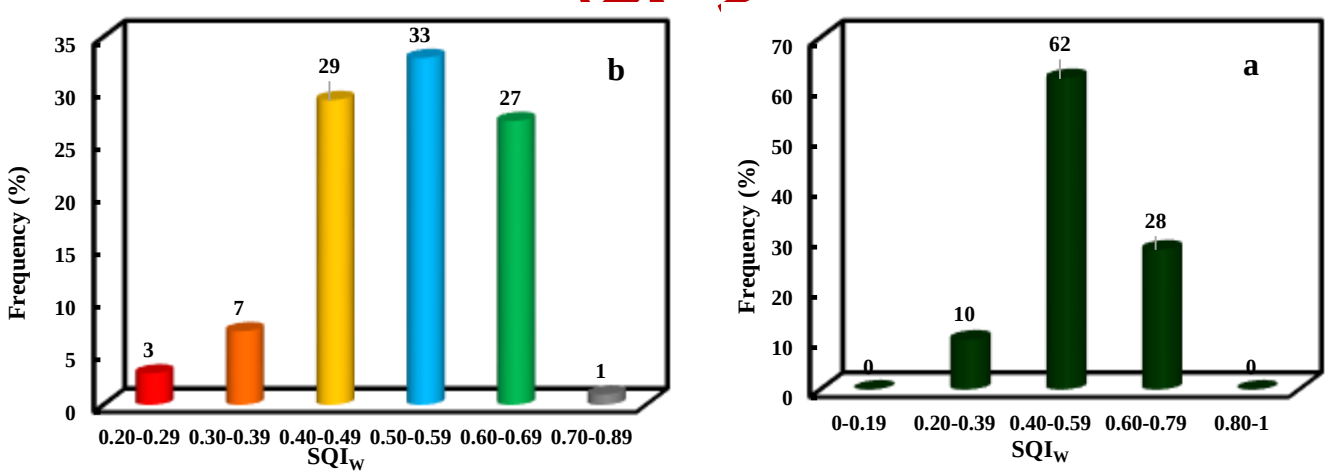
میزان شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W) در منطقه مورد مطالعه در دامنه ۰/۷۱ – ۰/۲۳ با میانگین ۰/۵۴ قرار داشت (جدول ۷) که در ۵ کلاس شامل کیفیت خیلی‌پائین (۰/۱۹–۰)، پائین (۰/۳۹ – ۰/۲۰)، متوسط (۰/۵۹ – ۰/۴۰)، خوب (۰/۷۹ – ۰/۶۰) و خیلی‌خوب (۱–۰/۸۰) تقسیم‌بندی گردید (Cantú et al., 2007). میزان فراوانی در هر کدام از این گروه‌ها به ترتیب برابر صفر، ۱۰، ۶۲، ۲۸ و صفر درصد بود (شکل ۲a). قرارگیری بخش قابل توجهی از منطقه در کلاس کیفیت متوسط و عدم قرارگیری هیچ نطقه‌ای در دو کلاس کیفیت خیلی‌پائین و خیلی‌خوب نشان دهنده ثبات نسبی کیفیت خاک در نگاه اولیه است. قرارگیری میانگین شاخص SQI_W در محدوده کلاس کیفیت متوسط و عدم ایجاد محدودیت شدید از طرف پارامترهای فیزیکی–هیدرولیکی خاک را می‌توان دلیل این امر بیان کرد.

برای بررسی جزئیات بیشتر از وضعیت کیفیت خاک منطقه، کلاس‌های پایه شاخص SQI_W (Cantú et al., 2007) به دو زیرکلاس شامل تثبیت شده و شکننده تفکیک شدند. این رویکرد بر پایه آستانه‌های حساسیت کارکردی خاک (Doran and Parkin, 1994) استوار است، زیرا نمونه‌های قرارگرفته در نیمه‌پائینی هر کلاس، مستعد تنزل کیفیت و قرارگیری در کلاس‌های پائین‌تر می‌باشند (شکل۲b). لذا، کلاس کیفیت پائین به دو زیرکلاس کیفیت پائین تثبیت شده (۰/۳۹–۰/۳۰) با فراوانی ۷ درصد و کیفیت پائین شکننده (۰/۲۹–۰/۲۰) با فراوانی ۳ درصد تقسیم شد. کلاس کیفیت متوسط به دو زیرکلاس کیفیت متوسط تثبیت شده (۰/۵۹–۰/۵۰) با فراوانی ۳۳ درصد و کیفیت متوسط شکننده (۰/۴۹–۰/۴۰) با فراوانی ۲۹ درصد تقسیم شد. این نتایج نشان داد که از مجموع ۶۲ درصد اراضی تشکیل دهنده کلاس کیفیت متوسط، ۲۹ درصد (نزدیک به یک سوم منطقه) در حالت شکننده قرار دارد و به عنوان یک هشدار مهم برای کیفیت خاک منطقه

ویرایش استاری نشده

محسوب می‌شود. کلاس کیفیت خوب به دو زیرکلاس کیفیت خوب تثبیت شده (۰/۷۹–۰/۷۰) با فراوانی ۱ درصد و کیفیت خوب شکننده (۰/۶۹–۰/۶۰) با فراوانی ۲۷ درصد تقسیم‌بندی شد که نشان می‌دهد حتی اراضی با کیفیت خوب این منطقه نیز در حالت شکننده قرار دارند. به عبارت دیگر، در مجموع ۵۹ درصد از منطقه فارغ از اینکه در کدام کلاس قرار دارند، در زیرکلاس‌های شکننده قرار گرفتند. در صورت تداوم استفاده از مدیریت فعلی و ادامه تخریب بیشتر اراضی با خاکورزی‌های سنگین و متوالی و کاهش مواد آلی، از فواصل گذار بین کلاس‌ها عبور کرده و در کلاس‌های پائین‌تر قرار می‌گیرند. علاوه بر این، ۱۰ درصد منطقه نیز در کلاس پایین قرار داشت که نشانگر محدودیت فیزیکی و هیدرولیکی است. به نظر می‌رسد فشردگی، تخریب ساختمان خاک، اختلال در نگهداری آب و تهویه اصلی‌ترین عوامل محدودکننده کیفیت فیزیکی–هیدرولیکی خاک‌های منطقه هستند. بنابراین، اقدامات حفاظتی مانند کاهش خاکورزی و استفاده از سیستم‌های خاکورزی حفاظتی و کشت‌های بدون خاکورزی، افزایش کربن‌آلی، استفاده از سرزن قبل از برداشت در مزارع سیب‌زمینی به منظور برگرداندن بقایای گیاهی به خاک، کودهای سبز و دامی و رعایت دوره‌های آیش در منطقه توصیه می‌شود.

مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شاخص‌های کیفیت خاک علاوه بر شیوه مدیریت زراعی، تحت تاثیر روش‌های محاسباتی و نوع ساختار مدل‌های ارزیابی نیز قرار دارند. Nasir et al. (2024) غلبه کلاس‌های کیفیت متوسط تا خوب را در اراضی زراعی چارسده پاکستان گزارش نمودند. میرخانی و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت خاک دشت تبریز را در محدوده متوسط تا ضعیف در اثر عملیات‌های زراعی ارزیابی و افت خصوصیات فیزیکی–هیدرولیکی خاک را گزارش نمودند. درحالی‌که، یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر کیفیت بالاتر، اما شکننده‌تر خاک‌های دشت اردبیل است. شاهپوری و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت خاک اراضی زراعی ملایر را کمتر از کاربری‌های دیگر آن منطقه برآورد کردند. آن‌ها، علت این امر را به مدیریت نامناسب اراضی زراعی و کشت متراکم نسبت دادند که با یافته‌های پژوهش حاضر همسویی دارد. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات انجام شده در مناطق مختلف نشان داد که قرارگیری اکثریت اراضی زراعی تحت سیستم کشت فشرده و مدیریت نامناسب در کلاس کیفیت متوسط، نمایانگر یک تعادل شکننده میان عوامل مخرب مدیریتی و پتانسیل ذاتی خاک است. تطبیق نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان داد که هرچند وضعیت شاخص‌های خاک در اراضی زراعی می‌تواند تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل شامل شرایط اقلیمی، مواد مادری، ویژگی‌های ذاتی خاک، نوع کاربری و شیوه‌های مدیریت قرار گیرد اما نقش مدیریت و شرایط محیطی در تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در مطالعات مختلف مورد تاکید قرار گرفته است.



شکل ۲. نمودار فراوانی شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W) در کلاس‌های اصلی (a) و زیر کلاس‌ها (b) در منطقه مورد مطالعه

۳،۳. شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)

به منظور ارزیابی پتانسیل اراضی زراعی در تأمین و ایجاد شرایط پایدار از نظر دسترسی به عناصر غذایی، وضعیت خصوصیات شیمیایی، حفظ ماده آلی و در کل بررسی توانایی شیمیایی–حاصلخیزی خاک برای تغذیه و رشد و نمو گیاهان و پشتیبانی از تولید محصولات زراعی،

شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) به عنوان یک ابزار کارآمد شناخته می‌شود (Laribi et al., 2024; Malo and Saha, 2025). میزان SFI در منطقه مورد مطالعه در دامنه ۰/۷۶ – ۰/۱۴ با میانگین ۰/۴۹ قرار داشت (جدول ۷) که در ۵ کلاس شامل حاصلخیزی خیلی‌پائین (۰/۱۹–۰)، حاصلخیزی پائین (۰/۳۹ – ۰/۲۰)، حاصلخیزی متوسط (۰/۵۹ – ۰/۴۰)، حاصلخیزی خوب (۰/۷۹ – ۰/۶۰) و حاصلخیزی خیلی‌خوب (۰/۱–۸۰) تقسیم‌بندی گردید (Wang et al., 2025). میزان فراوانی در هر کدام از این گروه‌ها به ترتیب برابر ۱، ۲۱، ۶۱، ۱۷ و صفر درصد بود (شکل ۳a). به دلیل قرارگیری میانگین شاخص SFI در محدوده کلاس حاصلخیزی متوسط، بخش قابل توجهی از منطقه از نظر حاصلخیزی خاک در طبقه متوسط قرار گرفت. عدم ایجاد محدودیت شدید توسط پارامترهای شیمیایی–حاصلخیزی خاک از دلایل دیگر این امر می‌باشد. با این وجود، قرارگیری ۲۲ درصد از این اراضی در کلاس‌های حاصلخیزی پائین و خیلی پائین نشان دهنده وجود محدودیت در برخی از این اراضی از نظر پشتیبانی از تولید محصول و تغذیه گیاه می‌باشد. فقر کربن‌آلی، نیتروژن و فسفر در برخی از پهنه‌ها، عوامل اصلی این محدودیت محسوب می‌شوند. به منظور اصلاح این محدودیت‌ها، افزایش محتوای کربن‌آلی خاک با مصرف کودهای آلی (کود دامی، کود سبز، کمپوست و...) و استفاده از کودهای نیتروژنه و فسفاته به صورت مکان‌محور و بر پایه آزمون خاک توصیه می‌شود. اولویت اجرای این اقدامات باید بر اساس نتایج نهایی شاخص‌ها و نقشه‌های پهنه‌بندی و با توجه به محدودیت غالب در هر بخش تعیین شود.

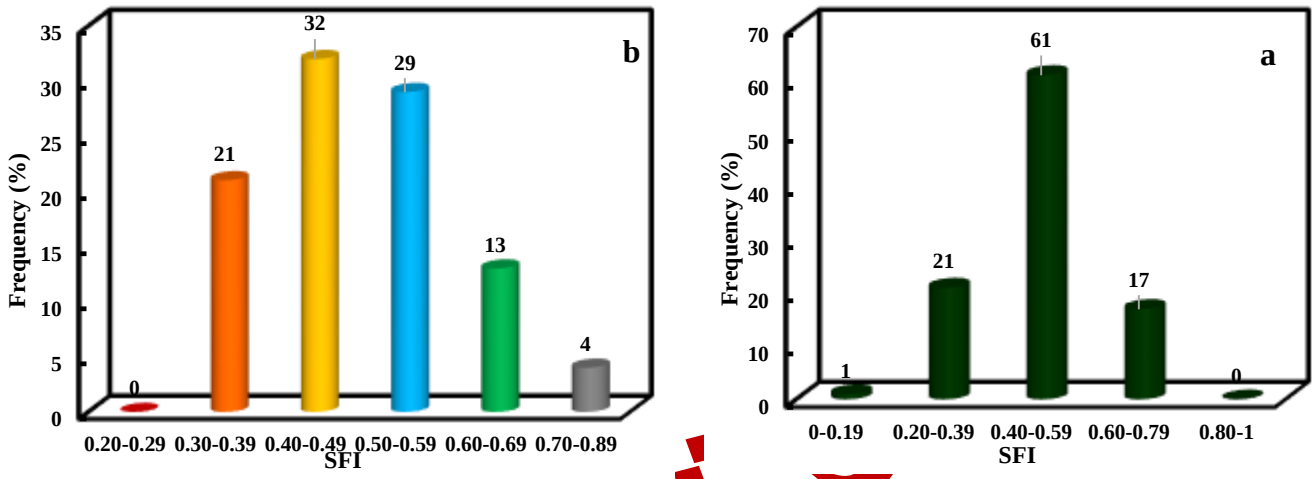
برای بررسی دقیق حاصلخیزی خاک و دسترسی عناصر غذایی به گیاه، کلاس‌های پایه شاخص SFI (Wang et al., 2025) به منظور حفظ یک‌دستی متدولوژیک و تسهیل مقایسه بین پهنه‌های مختلف دو شاخص SQIv و SFI و بر پایه آستانه‌های حساسیت کارکردی خاک (Doran and Parkin, 1994) در دو زیرکلاس شامل تثبیت شده و شکننده تقسیم‌بندی شدند (شکل۳b). مطابق این تقسیم‌بندی کلاس حاصلخیزی پائین به دو زیرکلاس حاصلخیزی پائین تثبیت شده (۰/۳۹–۰/۳۰) با فراوانی ۲۱ درصد و حاصلخیزی پائین شکننده (۰/۲۹–۰/۰) با فراوانی صفر درصد تقسیم شد. لذا، تمامی اراضی تشکیل دهنده کلاس حاصلخیزی پائین در حالت تثبیت شده قرار دارند و در صورت مدیریت صحیح می‌توانند وارد کلاس متوسط حاصلخیزی شوند. بر عکس، در صورت عدم توجه به افزایش کربن‌آلی و تخلیه عنصری، حاصلخیزی این اراضی به کلاس پائین‌تر تنزل می‌یابد. کلاس حاصلخیزی متوسط به دو زیرکلاس حاصلخیزی متوسط تثبیت شده (۰/۵۹–۰/۵۰) با فراوانی ۲۹ درصد و حاصلخیزی متوسط شکننده (۰/۴۹–۰/۴۰) با فراوانی ۳۲ درصد تقسیم شد. لذا حدود یک سوم (۳۲٪) از این منطقه در زیرکلاس حاصلخیزی متوسط و شکننده قرار دارد. این آمار هشداری مهم برای حاصلخیزی و تولید محصول در منطقه بوده و در صورت غفلت در مدیریت مناسب، کیفیت حاصلخیزی این پهنه به سرعت به کلاس‌های پائین‌تر تنزل خواهد یافت. کلاس حاصلخیزی خوب به دو زیرکلاس حاصلخیزی خوب تثبیت شده (۰/۷۹–۰/۷۰) با فراوانی ۴ درصد و حاصلخیزی خوب شکننده (۰/۶۹–۰/۶۰) با فراوانی ۱۳ درصد تقسیم‌بندی شد که نمایانگر شکنندگی بالا در بخش عمده‌ای از کلاس حاصلخیزی خوب در این منطقه است.

با توجه به مطالب فوق، در مجموع ۴۵ درصد از منطقه فارغ از اینکه در کدام کلاس قرار دارند، در زیرکلاس‌های شکننده و ناپایدار قرار داشت. در صورت تداوم استفاده از مدیریت زراعی کنونی، عدم افزایش کربن‌آلی و عدم جایگزینی تخلیه عنصری ناشی از کشاورزی پی در پی در منطقه، این پهنه‌ها از فواصل گذار بین کلاس‌ها عبور کرده و در کلاس‌های پائین‌تر قرار می‌گیرند. بنابراین، اقدامات مدیریتی مانند مدیریت تلفیقی حاصلخیزی و تغذیه گیاه با استفاده تلفیقی از کودهای آلی، شیمیایی و زیستی، استفاده از سرزن مکانیکی و بازگرداندن بقایای گیاهی به خاک در مزارع سیب‌زمینی، اجتناب از آتش‌زدن بقایای گیاهی و افزایش محتوای موادآلی خاک با استفاده از کودهای دامی، سبز، اسید هیومیک و در نهایت آنالیز سالانه خاک مزارع و استفاده از کودها با در نظر گرفتن نیاز خاک و گیاه توصیه می‌شود.

مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین نشان دهنده تأثیر میزان کربن‌آلی خاک، وضعیت خصوصیات شیمیایی و دسترسی عناصر غذایی در حاصلخیزی خاک می‌باشد. فیاض و همکاران (۱۴۰۰) با ارزیابی شاخص حاصلخیزی خاک نشان داد که پارامترهای کربن آلی، pH و پتاسیم عوامل کلیدی کنترل کننده حاصلخیزی خاک در مناطق غرب استان گیلان هستند که با یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص نقش کلیدی محتوای کربن‌آلی و نیتروژن خاک در منطقه اردبیل همسو می‌باشد. رحمانی و همکاران (۱۴۰۵) در پژوهشی بیان کرد که بیش از ۷۰ درصد از اراضی مناطق نیمه خشک ایلام در کلاس حاصلخیزی خوب و خیلی خوب قرار دارد. در پژوهش حاضر، اکثر اراضی در کلاس حاصلخیزی متوسط قرار داشت که علت این امر را می‌توان به بهره‌برداری فشرده، کشت محصولات پرتوقع و عدم اتخاذ مدیریت زراعی مناسب نسبت داد. Tunçay et al. (2021) نشان داد که ادغام زمین‌آمار و ArcGIS در تبیین ناهمگونی فضایی حاصلخیزی

ویرایش اولیه

خاک یک ابزار کاربردی و موثر است که ضرورت استفاده از مدیریت مکان‌محور حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه با استفاده از زمین‌آمار در این پژوهش را تایید می‌کند. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان داد که هرچند وضعیت شاخص‌های خاک در اراضی زراعی می‌تواند تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل شامل شرایط اقلیمی، مواد مادری، ویژگی‌های ذاتی خاک، نوع کاربری و شیوه‌های مدیریت قرار گیرد، اما نقش مدیریت و شرایط محیطی در تغییرپذیری ویژگی‌های خاک در مطالعات مختلف مورد تاکید قرار گرفته است.



شکل ۳. نمودار فراوانی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) در کلاس‌های اصلی (a) و زیرکلاس‌های (b) منطقه مورد مطالعه

۴،۳. تحلیل ساختار مکانی و واریوگرامی شاخص‌های مورد مطالعه

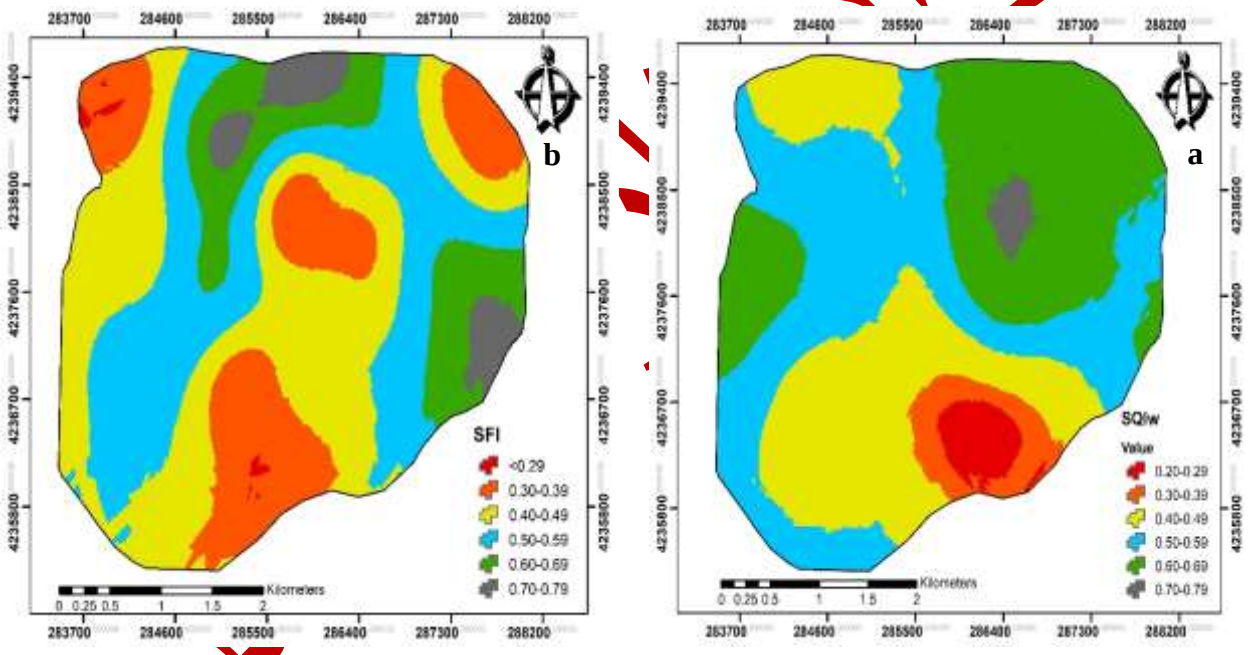
پیش از انجام تحلیل زمین‌آماری، داده‌ها از نظر توزیع آماری احتمال وجود روند مکانی بررسی شدند. ابتدا آمار توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل، حداکثر و ضریب تغییرات محاسبه شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک و بررسی نمودارهای توزیع ارزیابی گردید. برای بررسی وجود روند مکانی، تغییرات مقادیر شاخص‌ها در امتداد مختصات جغرافیایی و با استفاده از ابزار تحلیل روند (Trend Analysis) در صفحات XZ و YZ در محیط نرم‌افزار ArcGIS ارزیابی و مناسب‌ترین روش برای مدل‌سازی ساختار مکانی و درون‌یابی انتخاب شد. پس از تأیید یا اعمال پیش‌پردازش‌های لازم، نیم‌تغییرنمای تجربی محاسبه و مدل نظری مناسب بر اساس معیارهای ارزیابی انتخاب شد. در نهایت، از روش درون‌یابی متناسب با ساختار مکانی داده‌ها برای تهیه نقشه‌های پراکنش شاخص‌ها استفاده گردید. بنابراین، روش کریجینگ معمولی با فرض ایستایی ضعیف برای درون‌یابی انتخاب شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار GS+ نیم تغییرنمای تجربی محاسبه و با ترسیم مدل‌های نظری به تغییرنمای تجربی، بهترین مدل انتخاب شد (جدول ۸). از معیارهای نیکویی یعنی R^2 و RSS و Range و C/C0+C برای انتخاب بهترین مدل نیم‌تغییرنما استفاده شد. معیار انتخاب مدل مناسب برای درون‌یابی هر شاخص به صورت بالاترین R^2 و Range و C/C0+C و کمترین RSS بود. بر این اساس، برای شاخص SQI_W مدل نمایی (Exponential) و برای شاخص SFI مدل کروی (Spherical) به عنوان مدل مناسب انتخاب شدند. در نهایت، با استخراج پارامترهای واریوگرام و انتخاب مدل مناسب، نقشه‌های پهنه‌بندی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شدند.

جدول ۸. اطلاعات زمین‌آماری نیم‌تغییر نماها برای شاخص‌های SQI_W و SFI

Range (m)	C/C0+C	RSS	R^2	Model	Index
۱۱۷۰۶	۰/۵۷۸	۱/۹۶۰×۱۰$^{-۶}$	۰/۷۶۸	نمایی	SQI_W
۱۰۱۶	۰/۶۴۵	۲/۱۶۰×۱۰$^{-۶}$	۰/۹۳۸	کروی	SFI

۵،۳. پهنه‌بندی و نحوه توزیع مکانی شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQI_W) و شاخص حاصلخیزی خاک (SFI)

نقشه پراکنش مکانی شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک (SQIw) در منطقه مورد مطالعه در شکل 4a ارائه شده است. بر این اساس، ۴۵۴ هکتار (۲۸٪) از مساحت کل منطقه (رنگ سبز و توسی) که در نواحی شمال شرقی و غرب منطقه مشاهده می‌شود از نظر کیفیت خاک در کلاس خوب قرار داشت که از این پهنه، ۴۳۷ هکتار (۲۷٪) متعلق به زیرکلاس کیفیت خوب شکننده (رنگ سبز) و ۱۶ هکتار (۱٪) متعلق به زیرکلاس کیفیت خوب تثبیت شده (رنگ توسی) بود. همچنین، ۱۰۰۴ هکتار (۶۲٪) از مساحت کل منطقه (رنگ زرد و آبی) که بیشتر در نواحی شمال غربی، مرکزی و جنوب غربی منطقه مشاهده می‌شود از نظر کیفیت خاک در کلاس متوسط قرار داشت. از این پهنه، ۴۷۰ هکتار (۲۹٪) در زیرکلاس کیفیت متوسط شکننده (رنگ زرد) و ۵۳۵ هکتار (۳۳٪) در زیرکلاس کیفیت متوسط تثبیت شده قرار گرفت. ۱۶۲ هکتار (۱۰٪) از مساحت کل منطقه (رنگ قرمز و نارنجی) که در مناطق جنوبی قابل مشاهده است از نظر کیفیت خاک در کلاس پائین قرار داشت که از این پهنه، ۴۹ هکتار (۳٪) متعلق به زیرکلاس کیفیت پائین شکننده (رنگ قرمز) و ۱۱۳ هکتار (۷٪) متعلق به زیرکلاس کیفیت پائین تثبیت شده (رنگ نارنجی) بود. پراکنش مکانی شاخص SQIw نشان داد که نواحی شمال شرقی و غربی کیفیت خاک مطلوب تری نسبت به نواحی مرکزی و جنوبی دارند که علت این امر را می‌توان به تمرکز زراعت سیب‌زمینی و فشردگی خاک در نواحی مرکزی و جنوبی در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. همچنین قرارگیری ۵۹٪ از منطقه در زیرکلاس‌های شکننده از نظر کیفیت خاک نمایانگر ناپایداری و آسیب‌پذیری بالای این منطقه از نظر تنزل کیفی می‌باشد.



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی و نحوه توزیع مکانی شاخص‌های SQIw و SFI در منطقه مورد مطالعه

نقشه پراکنش مکانی شاخص حاصلخیزی خاک (SFI) در منطقه مورد مطالعه در شکل شماره 4b ارائه شده است. بر این اساس، ۲۷۵ هکتار (۱۷٪) از مساحت کل منطقه (رنگ سبز و توسی) که در نواحی شمال و جنوب شرقی منطقه مشاهده می‌شود از نظر حاصلخیزی خاک در کلاس خوب قرار داشت. از این پهنه، ۲۱۱ هکتار (۱۳٪) در زیرکلاس حاصلخیزی خوب شکننده (رنگ سبز) و ۶۵ هکتار (۴٪) در زیرکلاس حاصلخیزی خوب تثبیت شده قرار گرفت. ۹۸۸ هکتار (۶۱٪) از مساحت کل منطقه (رنگ زرد و آبی) که بیشتر در نواحی شمال غربی، مرکزی و غربی پراکنده می‌باشند از نظر حاصلخیزی خاک در کلاس متوسط قرار داشت. از این پهنه، ۵۱۸ هکتار (۳۲٪) متعلق به زیرکلاس حاصلخیزی متوسط شکننده (رنگ زرد) و ۴۷۰ هکتار (۲۹٪) متعلق به زیرکلاس حاصلخیزی متوسط تثبیت شده بود. ۳۴۰ هکتار (۲۱٪) از مساحت کل منطقه (رنگ نارنجی) که در مناطق مرکزی، جنوبی و شمال غربی قابل مشاهده است از نظر حاصلخیزی خاک در کلاس پائین قرار داشت که تمامی این پهنه در زیرکلاس حاصلخیزی پائین تثبیت شده قرار گرفت. همچنین ۱۶ هکتار (۱٪) از منطقه

مورد مطالعه (رنگ قرمز) در کلاس حاصلخیزی خیلی پایین قرار داشت. پراکنش مکانی شاخص SFI نشان می‌دهد که نواحی شمال و جنوب شرقی حاصلخیزی خاک مطلوب‌تری نسبت به نواحی مرکزی، جنوبی و غربی دارند که علت این امر را می‌توان به مصرف بدون آزمون خاک کودهای شیمیایی در کل منطقه، کمبود کربن‌آلی و عدم تعادل تغذیه‌ای در نواحی مرکزی، جنوبی و غربی در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. همچنین، قرارگیری ۴۵٪ از منطقه در زیرکلاس‌های شکننده از نظر حاصلخیزی خاک نمایانگر ناپایداری و آسیب‌پذیری بالای این منطقه از نظر تنزل حاصلخیزی خاک می‌باشد.

۶،۳. تحلیل فضایی الگوهای مکانی SQI_W و SFI و ضرورت ارزیابی تفکیک‌شده

مقایسه و تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی شاخص‌های SQI_W و SFI نشان دهنده تفاوت قابل توجه در مکان و نحوه توزیع کلاس‌های مختلف این دو شاخص است. مناطق شمال شرقی و غربی کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی مناسبی داشت و مناطق شمال و جنوب شرقی از نظر حاصلخیزی خاک در وضعیت مناسبی هستند. این الگوی ناهمگونی مکانی برای تمامی کلاس‌های دو شاخص SQI_W و SFI در کل منطقه مطالعاتی قابل مشاهده است. اگرچه این نقشه‌ها بر اساس مدل‌سازی زمین‌آماری و واریوگرامی (بخش ۴،۳ و جدول ۸) تهیه شده‌اند، اما برای تایید آماری این واگرایی مکانی، از ضریب همبستگی پیرسون نیز استفاده شد. عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین دو شاخص (r = 0.029) و استقلال آماری الگوهای مکانی آن‌ها، به طور کمی اثبات می‌کند که این دو شاخص از نظر توزیع فضایی مستقل از یکدیگر هستند (جدول ۹). لذا، ترکیب دو الگوی متفاوت در یک شاخص یکپارچه موجب تعدیل در محدودیت‌های موجود در منطقه و ایجاد اثر پوشانندگی خواهد شد. به عبارتی دیگر، وجود حاصلخیزی مطلوب در یک منطقه می‌تواند وضعیت نامناسب فیزیکی-هیدرولیکی خاک را تعدیل نماید و بر عکس. وجود اثر پوشانندگی در زیرکلاس‌های شاخص‌های SQI_W و SFI نیز مشاهده شد. به ترتیب ۵۸ و ۴۶ درصد از منطقه از نظر شاخص‌های SQI_W و SFI در حالت‌های شکننده و با پراکنش‌مکانی متفاوت قرار داشت. لذا، بررسی جداگانه و توام این دو شاخص، امکان بررسی دقیق‌تر کیفیت و حاصلخیزی خاک را فراهم و بر ضرورت اعمال مدیریت جداگانه و تفکیک شده تاکید می‌کند.

۷،۳. همبستگی پیرسون

نتایج همبستگی شاخص SQI_W و SFI با خصوصیات مورد استفاده در مدل‌ها و با یکدیگر در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که شاخص SQI_W با درصد رس (r=۰/۷۱۹)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (r=۰/۷۱۵) و آب قابل استفاده گیاه (r=۰/۷۲۴) همبستگی مثبت در سطح احتمال یک درصد داشت. این نوع همبستگی نمایانگر اهمیت ذرات رس و پایداری خاکدانه‌ها در بهبود وضعیت ساختمانی خاک، نگهداری آب و پایداری خاک در منطقه است. بین شاخص SQI_W با جرم مخصوص ظاهری خاک، درصد شن و هدایت هیدرولیکی همبستگی منفی معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد به ترتیب با ضرایب ۰/۸۷۵-، ۰/۹۵۲-، ۰/۵۹۰- وجود داشت. این نوع همبستگی نشان می‌دهد که تردد و عملیات‌های زراعی سنگین در اثر زراعت سیب‌زمینی منجر به تخریب ساختمان فیزیکی و فشردگی خاک‌های منطقه شده است، به طوری که با از دست رفتن منافذ مطلوب خروج سریع آب از محیط ریشه رخ داده است. وجود همبستگی منفی معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین شاخص SQI_W با نسبت جذب سدیم (SAR) با ضرایب ۰/۲۵۹- نشان می‌دهد که این پارامتر حتی در مقادیر اندک نیز نقش پررنگی در کاهش کیفیت فیزیکی و هیدرولیکی خاک بازی می‌کند.

جدول۹. ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص SQI_W و SFI خصوصیات مورد استفاده در محاسبه آن‌ها

شاخص	Sand	Silt	Clay	BD	MWD	KS	AWC	EC	SAR	CCE
SQI	-۰/۹۵۲**	۰/۳۷۸**	۰/۷۱۹**	-۰/۸۷۵**	۰/۷۱۵**	-۰/۵۹۰**	۰/۷۲۴**	-۰/۱۳۹	-۰/۲۵۹**	۰/۰۸۵

شاخص	SQI	N	P	K	OC	CEC	pH
SFI	۰/۰۲۹	۰/۸۹۳**	۰/۱۵۸	۰/۴۲۸**	۰/۸۹۳**	۰/۲۷۲**	-۰/۰۹۰

n = ۱۰۰; *p < ۰/۰۵; **p < ۰/۰۱ (Pearson correlation)

نتایج همبستگی شاخص SFI با خصوصیات مورد استفاده در مدل نشان داد که شاخص SFI با کربن آلی و نیتروژن کل همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد به ترتیب با ضریب ۰/۸۹۳ و ۰/۸۹۳ داشت که نشان دهنده اهمیت بسیار بالای کربن‌آلی خاک و نیتروژن در حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه می‌باشد. همچنین، در محیط خاک ذخایر نیتروژن به شدت به منابع کربن‌آلی خاک وابسته می‌باشند و این امر موجب هم‌راستایی این دو پارامتر با همدیگر شده است. هم‌راستایی این دو پارامتر به معنای یکسان بودن نقش بیوشیمیایی آن‌ها نیست. نیتروژن به‌طور مستقیم به شکل یون‌های معدنی جذب گیاه می‌شود، در حالی که کربن آلی نقشی غیرمستقیم اما حیاتی در بهبود فعالیت زیستی، تشکیل کمپلکس‌های آلی و افزایش قابلیت دسترسی عناصر ایفا می‌کند. همچنین، پیش از تعیین ساختار نهایی شاخص‌ها، روابط بین متغیرها با استفاده از ماتریس همبستگی ارزیابی شد. در مورد متغیرهایی که همبستگی بالایی با یکدیگر داشتند، نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی و میزان مشارکت هر متغیر در ساختار تغییرات داده‌ها به‌طور همزمان مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب، انتخاب نهایی متغیرها و ضرایب وزن‌دهی بر اساس نتایج تحلیل آماری انجام گرفت. این نتایج با وزن اختصاص داده شده در جدول اشتراکات حاصل از PCA مطابقت داشت (جدول ۶). شاخص حاصلخیزی خاک با پتاسیم قابل استفاده گیاه (r=۰/۴۲۸) و مجموع کاتیون‌های قابل تبادل (r=۰/۲۷۲) همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد داشت که بیان می‌کند این دو ویژگی در مراتب بعدی اهمیت و تأثیرگذاری بر حاصلخیزی خاک منطقه قرار دارند. همبستگی معنی‌داری بین pH و فسفر قابل استفاده گیاه با SFI مشاهده نشد. واکنش خاک در منطقه تغییرپذیری کمتری داشت و در شاخص SFI تاثیر کمتری دارد که با نتایج جدول اشتراکات وزنی (جدول ۶) هم‌خوانی دارد.

نتایج همبستگی پیرسون نشان داد که بین دو شاخص SFI و SQI_w رابطه معنی‌دار وجود ندارد (r=۰/۰۲۹) که بیانگر مستقل بودن آن‌ها از یکدیگر است. ادغام خصوصیات فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی-شیمیایی خاک در شاخص کیفیت خاک، می‌تواند موجب پوشش محدودیت‌های خاک توسط ویژگی‌های مطلوب شود. به طوری که در تناوب گندم-سیب‌زمینی، خاکورزی سنگین و تردد مداوم ماشین‌آلات کشاورزی موجب تخریب وضعیت فیزیکی خاک می‌شود، در حالی است که مصرف کودها، وضعیت عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک را در سطح مطلوبی حفظ می‌کند. رابطه ضعیف میان شاخص‌های SFI و SQI_w نشان می‌دهد که اگرچه برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌توانند از طریق تأثیر بر ماده آلی، نگهداری عناصر غذایی و سایر فرآیندهای خاک با ویژگی‌های حاصلخیزی ارتباط داشته باشند، ولی میزان و جهت این روابط می‌تواند تحت تأثیر شرایط محلی، شیوه مدیریت و ساختار محاسباتی هر شاخص قرار گیرد. بنابراین، تفسیر رابطه میان دو شاخص باید علاوه بر همبستگی کلی، با توجه به روابط بین متغیرهای تشکیل‌دهنده، نحوه نمره‌دهی و وزن‌دهی آن‌ها انجام شود.

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف برآورد و تحلیل فضایی کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک با استفاده از مدل‌های SQI_w بر پایه ۱۰ ویژگی فیزیکی- هیدرولیکی خاک و SFI بر پایه شش پارامتر شیمیایی-حاصلخیزی خاک و تهیه نقشه پهنه‌بندی آن‌ها با استفاده از زمین‌آمار و ArcGIS و ارائه توصیه‌های مدیریتی مکان محور در ۱۶۲۰ هکتار از اراضی زیرکشت فشرده و تناوبی گندم و سیب‌زمینی در اردبیل انجام شد. بر اساس شاخص‌های SQI_w و SFI، به ترتیب ۱۰ و ۲۱ درصد از منطقه در کلاس کم قرار داشتند که نمایانگر وجود پهنه‌های ضعیف از نظر کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک در منطقه است. میانگین SQI_w و SFI به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۹ بود. قرارگیری اغلب خاک‌های منطقه در کلاس متوسط کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک در نگاه اولیه می‌تواند گمراه کننده باشد. بررسی زیر کلاس هر دو شاخص جزئیات بیشتری از وضعیت آن‌ها را آشکار ساخت. به ترتیب، ۵۹ و ۴۵ درصد نمونه‌ها از نظر کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک در زیرکلاس‌های شکننده قرار داشتند که بیانگر حساسیت بالای اراضی مورد مطالعه از نظر کیفیت فیزیکی-هیدرولیکی و حاصلخیزی خاک و استعداد آن‌ها در زمینه کاهش کلاس کیفیت و حاصلخیزی است.

بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی SQI_w و SFI در منطقه، واگرایی مکانی بالایی را بین پهنه‌های مختلف این دو شاخص به خصوص در نواحی مرکزی و جنوبی که اکثرا تحت کشت فشرده سیب‌زمینی می‌باشند، نشان داد. این واگرایی ناشی از مصرف بالای کودهای شیمیایی، عدم توجه به افزایش کربن‌آلی و ساختار فیزیکی خاک و همچنین عملیات‌های زراعی سنگین در اثر زراعت سیب‌زمینی در نواحی مرکزی و جنوبی می‌باشد. عدم همبستگی معنی‌دار (۰/۰۲۹) بین SFI و SQI_w نشان داد که این دو شاخص مستقل از یکدیگر است. ادغام

ویرایش اولیه

خصوصیات فیزیکی–هیدرولیکی و حاصلخیزی–شیمیایی خاک در قالب شاخص SQIw محدودیت‌های خاک مورد مطالعه توسط پارامترهایی که وضعیت آن‌ها در خاک مناسب است را تعدیل کرده و اثر پوششی ایجاد می‌شود. در تناوب گندم–سیب‌زمینی، خاکورزی‌های سنگین و تردد مداوم ماشین‌آلات موجب تخریب و ایجاد محدودیت‌هایی در شرایط فیزیکی خاک می‌شود، در حالی که در این اراضی محتوای عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک در اثر استفاده از کودهای مختلف در شرایط مناسبی قرار دارد. لذا، مطالعه جداگانه این دو شاخص برای جلوگیری از ایجاد اثر پوششی برای محدودیت‌ها و مدیریت مکان محور شاخص‌های SQIw و SFI به ویژه در اراضی زراعی توصیه می‌شود.

به منظور ممانعت از کاهش کیفیت و حاصلخیزی خاک پیشنهاد می‌شود اقدامات اصلاحی مانند افزایش محتوی کربن آلی خاک (کودهای دامی، مرغی و کود سبز)، اجتناب از سوزاندن بقایای گیاهی و الزام استفاده از سرزن مکانیکی در مزارع سیب‌زمینی، اعمال کود دهی بر پایه آزمون خاک و پایش سالانه مزارع، استفاده از روش‌های خاکورزی حفاظتی مانند سیستم‌های بی‌خاکورزی و خاکورزی حداقل با اولویت بخشی به مناطق مرکزی، جنوبی و زیرکلاس‌های شکننده صورت گیرد.

منابع

۱. خان‌زاده ایوریق، مرتضی؛ گلی کلانپا، اسماعیل؛ شهاب آرخازلو، حسین و علیزاده، مهناز (۱۴۰۴). ارزیابی وضعیت عناصر غذایی پرمصرف (NPK) و برخی ویژگیهای شیمیایی در تعدادی از خاک‌های زراعی منطقه ایوریق اردبیل. *تحقیقات کاربردی خاک*، ۱۳(۱)، ۱–۱۸.

۲. رحمانی، اصغر؛ رستمی‌نیا، محمود؛ صیدی، نسیبه و موسوی، سید روح‌الله (۱۴۰۵). مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی شاخص حاصلخیزی خاک در دو منطقه خشک و نیمه‌خشک استان ایلام. *پژوهش‌های خاک*، ۴۰(۱)، ۱–۲۱.

۳. شاهپوری، فاطمه؛ حسن‌زاده، نسرین؛ سلگی، عیسی و ضرابی، محبوبه (۱۴۰۲). ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) در کاربری‌های مختلف شهرستان ملایر با استفاده از روش مجموعه حداقل داده (MDS). *محیط زیست طبیعی*، ۷۶(۴)، ۵۷۹–۵۹۲.

۴. فیاض، حورا؛ یغمائیان، نفیسه؛ صبوری، عاطفه و شیرین فکر، احمد (۱۴۰۰). ارزیابی شاخص حاصلخیزی خاک با استفاده از روشهای AHP-Fuzzy و پارامتریک در باغهای چای با عملکرد متفاوت. *مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)*، ۴۴ (۳)، ۲۷۷–۲۹۴.

۵. لطفی آرپاچائی، زهرا؛ اسمعلی عوری، اباذر؛ هاشمی مجد، کاظم و نجفی، نصرت‌اله (۱۳۹۲). ارزیابی حاصلخیزی خاک دشت اردبیل برای گندم و سیب‌زمینی بر اساس برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *آب و خاک*، ۲۷(۱)، ۴۵–۵۳.

۶. معرفتی، حامد؛ شهاب آرخازلو، حسین؛ اصغری، شکراله و سلطانی طولارود، علی اشرف (۱۴۰۳). بررسی اثر فرسایش خاک بر تغییرات شاخص‌های تجمعی کیفیت خاک در جنوب اردبیل. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۴ (۳)، ۴۳–۶۵.

۷. میرخانی، رسول؛ بای‌بوردی، اکبر؛ سعادت، سعید؛ رضایی، حامد و اسماعیل‌نژاد، لیلا (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم آبی در دشت تبریز. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴(۱۲)، ۱۹۸۱–۱۹۹۴.

References:

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(6), 1945–1962. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945

Arvidsson, J., & Håkansson, I. (2014). Response of different crops to soil compaction: short-term effects in Swedish field experiments. *Soil and Tillage Research*, *138*, 56–63. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.006

Askari, M. S., & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, *230–231*, 131–142. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019

Awwal, Y. A., Young, A. C., & Linus, M. (2026). Geospatial analysis of soil quality index in relation to land use/land cover and spectral indices in Wukari, Nigeria. *Kuwait Journal of Science*, *53*(3), 100577.

ویراستاری نشده

https://doi.org/10.1016/j.kjs.2026.100577
Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *120*, 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030
Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluation of soil quality using indicators and indices. *Ciencia del Suelo*, *25*(2), 173–178. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672007000200008
Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Eds.), Defining soil quality for a sustainable environment (SSSA Special Publication No. 35, pp. 3–21). *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1
FAO & ITPS. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf
Fayyaz, H., Yaghmaeian, N., Sabouri, A., & Shirinfekr, A. (2021). Evaluation of soil fertility index using Fuzzy-AHP and parametric methods in tea gardens with different yields. *Agricultural Engineering*, *45*(3), 285–302. https://doi.org/10.22055/agen.2021.38284.1613 (In Persian)
Gee, G. W., & Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), Methods of soil analysis: Part 4-Physical methods (pp. 255–293). *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12
González-Brijo, F., Santos Hernández, A. F., Sahagún-García, A., Hernández-Pedraza, L. A., Gallardo-Lancho, J. F., & Pérez-Nieto, J. (2025). Effects of different tillage systems on soil properties and crop yield in a Mollisol cropland after 9, 22, and 25 years of implementation in Chapingo, Mexico. *Soil Systems*, *9*(4), 125. https://doi.org/10.3390/soilsystems9040125
Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.
Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, *82*(2), 121–145. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009
Hanway, J. J., & Heidel, H. (1952). Soil analysis methods as used in Iowa State College Soil Testing Laboratory. *Iowa State College of Agriculture Bulletin*, *57*, 1–31.
Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In A. Klute (Ed.), Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods (2nd ed., pp. 425–442). *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17
Khanzadeh, M., Goli Kalanpa, E., Shahab, H., & Alizadeh, M. (2024). Evaluation of the status of macronutrients (NPK) and some chemical properties in a number of agricultural soils of Iveriq region, Ardabil. *Applied Soil Research*, *13*(1), 1–18. https://doi.org/10.30466/asr.2025.55487.1852(In Persian)
Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, *7*(5), 5875–5895. https://doi.org/10.3390/su7055875
Laribi, A., Thelaidjia, R., & Dehnoun, Z. (2024). Mapping nutrient and soil fertility indexes for Durum Wheat in the La Mina region of Algeria. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *23*(8), 563–568. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2024.06.005
Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, *1*(10), 544–553. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8
Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), Methods of soil analysis: Part 3- Chemical methods (pp. 437–474). *Soil Science Society of America*. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15
Lotfi Aria Chani, Z., Esmali Ouri, A., Hashemi Majd, K., & Najafi, N. (2013). Evaluation of soil fertility of Ardabil plain for wheat and potato based on some chemical properties using AHP and GIS. *Journal of Water and Soil*, *27*(3), 577-586. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.22200 (In Persian)

Malo, S. K., & Saha, S. (2025). Assessment of the soil fertility index (SFI) for sustainable nutrient management in rice-based cropping systems of Barind tract of West Bengal, India. *Discover Soil*, *2* (1), Article 130. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00130-8

Marefati, H., Shahab Arkhazloo, H., Asghari, Sh., & Soltani Toolarood, A. A. (2024). The effect of gully erosion on integrated soil quality indices in South of Ardabil. *Environmental Erosion Research*, *14*(3), 43–65. https://doi.org/10.61186/jeer.14.3.43 (In Persian)

Mirkhani, R., Baybordi, A., Saadat, S., Rezaei, H., & Esmaeilnejad, L. (2023). Soil quality assessment of irrigated wheat fields in Tabriz plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *54*(12), 1981-1994. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363792.669555 (In Persian)

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, *27*, 31–36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5

Mujiyo, Nariyanti, S., Suntoro, Herawati, A., Herdiansyah, G., Irianto, H., Riptanti, E. W., & Qonita, A. (2022). Soil fertility index based on altitude: A comprehensive assessment for the cassava development area in Indonesia. *Annals of Agricultural Sciences*, *67(2)*, 158–165.
https://doi.org/10.1016/j.aoas.2022.10.001

Mukherjee, A., & Lal, R. (2014). Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS one*, 9(8), e105981. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105981

Nasir, M. J., Haider, M. F., Ali, Z., Akhtar, W., & Alam, S. (2024). Evaluation of soil quality through simple additive soil quality index (SQI) of Tehsil Charsadda, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *23*(1), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.09.001

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (USDA Circular No. 939). U.S. Department of Agriculture.

Ormanci, I. F., & Dengiz, O. (2025). Establishing and verifying soil quality index model based on GIS and remote sensing for cultivated lands under semi-humid terrestrial ecosystem. *International Soil and Water Conservation Research*, *13*(2), 300–312. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.10.004

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, *314*, 122–137. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009

Rahmani, A., Rostaminya, M., Sayedi, N., & Mousavi, S. R. (2026). Spatial modeling and prediction of the soil fertility index in two arid and semi-arid regions of Ilam Province, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, Advance online publication. https://doi.org/10.22092/ijsr.2026.371527.803 (In Persian)

Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., & Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, *40*, 19–26. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003

Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (USDA Agriculture Handbook No. 60). U.S. Government Printing Office.

Singh, M. J., & Khera, K. L. (2009). Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Research and Management*, *23*(2), 152–167.
https://doi.org/10.1080/15324980902817147

Shukla, M. K., Lal, R., & Ebinger, M. (2004). Soil quality indicators for the North Appalachian experimental watersheds in Coshocton, Ohio. *Soil Science*, *169*(3), 195–205.
https://doi.org/10.1097/01.ss.0000122523.03492.79

Shahpouri, F., Hassanzadeh, N., Solgi, E., & Zarrabi, M. (2022). Evaluation of soil quality index (SQI) in different land uses of Malayer County using the minimum data set (MDS) method. *Journal of Natural Environment*, *75*(3), 455–469. https://doi.org/10.22059/jne.2022.334297.2339 (In Persian)

Shi, C., Li, J., Wang, Y., & Ge, L. (2018). Investigation on soil fertility of newly increased cultivated land after wasteland improvement in loess hilly region—A case study in Ganquan County, Shaanxi Province. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *394*, Article 052044. https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/5/052044

Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (pp. 1201–1229). Soil Science

Society of America. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c40
Tunçay, T., Kılıç, Ş., Dedeoğlu, M., Dengiz, O., Başkan, O., & Bayramin, İ. (2021). Assessing soil fertility index based on remote sensing and GIS techniques with field validation in a semiarid agricultural ecosystem. *Journal of Arid Environments*, *190*, 104525.
https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104525
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. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003
Webster, R., & Oliver, M. A. (2007*). Geostatistics for Environmental Scientists* (2nd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470517277
Wibowo, H., & Kasno, A. (2021). Soil organic carbon and total nitrogen dynamics in paddy soils on the Java Island, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *648*(1), 012192. https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012192
Wang, Z., Wang, S., Xu, L., Guo, Q., Chen, Y., Qiu, W., & Sun, J. (2025). Comparative evaluation methods of comprehensive soil fertility in coastal saline-alkali lands of Jiangsu. *Land*, *14*(3), 469. https://doi.org/10.3390/land14030469
Weidhuner, A., Zandvakili, O. R., Koduru, S., Krausz, R., Cook, R. L., Hanauer, A., Jones, K., & Sadeghpour, A. (2026). Effect of long-term tillage practices on soil physical properties, corn and soybean yield, and nutrient balance. *Field Crops Research*, *336*, 110210. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110210

ویرایشناری نشده