

Investigating Spatial Variability of Soil Quality Indices in Nazar Abad Fields, West of Alborz Province

ALI REZA VAEZI¹, RASOUL MIRKHANI^{1*}, HAMED REZAEI², LEILA ESMAEILNEJAD³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

3. Department of Soil Science, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: March. 14, 2020- Revised: Apr. 22, 2020- Accepted: May. 3, 2020)

ABSTRACT

Information about the spatial distribution of soil quality is one of the most significant issues in recognition, planning, management and optimal exploitation of soil resources in each area. In this study, the characteristics of soil surface (0-30 Cm) were measured in 95 fields in the Nazar Abad region in Alborz province and the factors influencing soil quality were selected using principal component analysis (PCA) method. In addition, the weighted additive soil quality index (SQI_w), the additive soil quality index (SQI_a) and the Nemero soil quality index (NQI) were determined using total data set (TDS) and minimum data set (MDS). Spatial variability of these soil quality indices were analyzed using geostatistics technique and their spatial distribution were determined using the Ordinary kriging method. Based on the results and among the soil quality indices, the SQI_w obtained from the MDS, had a higher accuracy in the area with R² of 0.89, mean absolute error (MAE) of 0.11 and normalized root mean squares error (NRMSE) of 0.1. The exponential variogram model (R² = 0.95) indicated that the SQI_w and SQI_a indices using MDS had the best fitness, whereas, the spherical model (R²= 0.90) was strongly fitted to the NQI index obtained from MDS. Furthermore, the effective range of spatial variability for SQI_a, SQI_w and NQI indices was 8, 10 and 11.5 kilometers, respectively. Soil quality of the fields in the area was strongly related to the soil particles size distribution, especially sand and clay percentages with coefficients of 0.90 and 0.85, respectively. Soil quality value in the area decreased considerably from west to east. This study revealed that the geostatistics technique can be used for spatial analysis of soil quality indices in the area and spatial distribution maps of these indices can be effectively used to plan the sustainable soil management strategies in the fields.

Keywords: Additive Soil Quality Index, Nemero Soil Quality Index, Particle Size Distribution, Principal Component Analysis, Spatial Distribution.

* Corresponding Author's Email: rasoul_mirkhani@yahoo.com

بررسی تغییرپذیری مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای منطقه نظرآباد در غرب استان البرز

علی‌رضا واعظی^۱، رسول میرخانی^{۱*}، حامد رضایی^۲، لیلا اسماعیل‌نژاد^۳

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳. گروه مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۱۴)

چکیده

آگاهی از توزیع مکانی کیفیت خاک از مهم‌ترین موضوعات در شناسایی، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع خاک در هر منطقه است. در این مطالعه ویژگی‌های خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) در ۹۵ مزرعه در منطقه نظرآباد استان البرز اندازه‌گیری و با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) داده‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) و ساده (SQI_a) و شاخص کیفیت نمره (NQI) با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها تعیین شدند. تغییرات مکانی شاخص‌های کیفی خاک با استفاده از فن زمین‌آمار تحلیل و توزیع مکانی آن‌ها با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین شد. بر اساس نتایج، شاخص SQI_w حاصل از حداقل ویژگی‌ها دقت بیشتری بر اساس آماره‌های R² برابر با ۰/۹۲، میانگین خطای مطلق (MAE) برابر با ۰/۰۹ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) ۰/۰۱ داشت. بهترین مدل آماری برازش‌یافته بر داده‌های شاخص SQI_w و SQI_a حاصل از حداقل داده‌ها مدل نمایی (R²=۰/۹۵) بود و برای شاخص NQI حاصل از حداقل داده‌ها مدل نیم‌تغییرنمای کروی بهترین برازش (R²=۰/۹۰) را داشت. همچنین دامنه تأثیر شاخص‌های SQI_w، SQI_a و NQI به ترتیب ۸، ۱۰ و ۱۱/۵ کیلومتر بود. کیفیت خاک کشتزارها به شدت وابسته به توزیع اندازه ذرات اولیه به ویژه شن و رس با ضریب وابستگی ۰/۹۰ و ۰/۸۵ بود. این ویژگی در منطقه از شرق به غرب روند کاهشی داشت. این پژوهش نشان داد که روش زمین‌آمار برای بررسی تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک کاربرد دارد و نقشه‌های توزیع مکانی این شاخص‌ها می‌تواند برای طراحی راهبردهای پایدار مدیریت خاک در کشتزارها به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمره، توزیع اندازه ذرات، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، توزیع مکانی.

مقدمه

کشاورزی بر مبنای دستگاه‌های اطلاعات مدیریتی از اهمیت به سزایی برخوردار است. ویژگی‌های خاک با نوع خاک، توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی رابطه زیادی دارند که همه آن‌ها در الگوی توزیع مکانی خاک اثرگذار هستند (Sanaeinejad *et al.*, 2010). تشخیص الگوی پراکنش مکانی می‌تواند به‌طور فزاینده‌ای برای مدیریت منابع طبیعی (Xin-*et al.*, 2009) و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده (Liu *et al.*, 2017) استفاده شود. شناخت تغییرات زمانی برای درک اثرات بلندمدت مدیریت خاک بسیار مهم است (Girei *et al.*, 2016). شناخت تغییرات زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌تواند چارچوبی برای توسعه برنامه‌ریزی مؤثر برای رسیدن به شیوه‌های کشاورزی پایدار فراهم کند (Douaik *et al.*, 2011).

ویژگی‌های خاک به‌صورت مکانی و زمانی از سطح یک مزرعه تا منطقه با مقیاس وسیع‌تر تغییر می‌نماید. تغییرات این ویژگی‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی (عوامل خاک‌سازی همانند مواد مادری) و عوامل بیرونی (همانند مدیریت خاک، کود دهی و تناوب زراعی) می‌باشند. شناخت تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک کلیدی برای درک فرآیندهای خاک در مقیاس مزرعه و حوزه آبخیز است (Corwin *et al.*, 2006). آگاهی از توزیع مکانی خصوصیات خاک از مهم‌ترین موضوعات در شناسایی، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب و خاک است (Asghari *et al.*, 2015). شناخت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و نحوه توزیع آن، به دلیل ماهیت تغییرپذیری مکانی بالای آن حتی در فواصل خیلی کم در چگونگی مصرف نهاده‌ها و دستیابی به مدیریت جامع

متغیر در موقعیت x_i و $x_i + h$ است. هر چه اندازه h افزایش یابد، تعداد جفت‌ها کم می‌شود.

کریجینگ روشی مناسب برای میان‌یابی است که بر منطق میانگین متحرک وزنی استوار است و می‌توان گفت بهترین تخمین‌گر نارایب است. روش میان‌یابی مکانی کریجینگ از روش‌های زمین‌آماري است که به دلیل نارایبی آن بر دیگر روش‌های میان‌یابی برتری دارد و به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف استفاده می‌شود (Liu et al., 2008). یکی از برتری‌های اصلی کریجینگ این است که به ازای هر تخمین می‌توان خطای آن را که اندازه‌گیری اولیه ندارد، محاسبه نمود و دامنه اطمینان آن تخمین را نیز محاسبه نمود (Theodossiou and Latinopoulos, 2006). در روش کریجینگ برآورد بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط موردنظر صورت می‌گیرد که طی آن می‌توان مقدار یک کمیت در نقاطی با مختصات نامعلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم به دست آورد. در روش کریجینگ از رابطه زیر برای تخمین مقدار متغیر در نقطه مجهول استفاده می‌شود:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{vi} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن Z_v^* مقدار تخمینی، λ_i وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه i ام Z_{vi} مقدار مشاهده‌ای نمونه i ام است.

روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای پیش‌بینی مقدار متغیر مجهول در یک موقعیت نمونه‌برداری نشده از مقادیر معلوم متغیر اندازه‌گیری شده در نقاط اطراف (نقاط همسایگی) استفاده می‌شود. این روش به‌صورت عکس فاصله به توان P بیان می‌شود که توان، نشان‌دهنده میزان اهمیت نقطه است. در این روش مقدار متغیر در نقطه مجهول از رابطه زیر به دست می‌آید (Trangmar et al, 1986):

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن: $Z(x, y)$ مقدار متغیر در نقطه مجهول، Z_i مقدار متغیر در نقطه معلوم، P توان و d فاصله نقطه مجهول تا نقطه i ام است.

در زمینه تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک پژوهش‌های زیادی انجام شده است؛ برای مثال Rahmanipour et al., (2014)

در سال‌های گذشته، تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک، از راه آزمایش‌های بلندمدت مزرعه مورد بررسی قرار می‌گرفت (Risser, 1991). امروزه به‌منظور تخمین متغیرهای مکانی یک منطقه از روش‌های زمین‌آماري استفاده می‌شود. این علم شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که قادر به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهای آماری به‌منظور برآورد خصوصیات موردنظر در مکان‌های نمونه‌برداری نشده با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه‌برداری شده، است (Mohammadi, 2006). برای درون‌یابی از روش‌های کریجینگ^۳، کوکریجینگ^۳ و وزن‌دهی عکس فاصله^۴ (IDW) استفاده می‌شود. آمار و زمین‌آمار اطلاعات مفیدی در رابطه با تغییرپذیری مکانی و ناهمگونی ویژگی‌های خاک در مناطق وسیع و ناهمگون مهیا می‌کند و ارزیابی تغییرپذیری مکانی و ناهمگونی ویژگی‌های خاک درک مناسبی از توابع خاک در درازمدت ایجاد می‌کند (Komnitsas et al., 2010). تفاوت اصلی این روش با آمار کلاسیک این است که در آمار کلاسیک، نمونه‌های گرفته‌شده از یک جامعه آماری، مستقل از یکدیگر بوده و وجود یک نمونه هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره نمونه بعدی نمی‌دهد. روش‌های زمین‌آماري وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می‌نمایند (Hasanipak, 1998). روش‌های مختلف زمین‌آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی را نشان می‌دهند. به‌طورکلی می‌توان گفت که زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرهایی می‌پردازد که دارای ساختار مکانی است و یا به‌عبارت‌دیگر بین مقادیر مختلف آن‌ها، فاصله و جهت قرار گرفتن آن‌ها یک ارتباط مکانی وجود دارد.

تئوری‌های آماری امکان کمی‌نمودن روابط مکانی بین نمونه در فواصل کوچک‌تر را فراهم کرده است. این تئوری بر خلاف آمار کلاسیک، بر اساس واریانس نمونه‌ها پایه‌گذاری شده است. نیم‌تغییرنما، اساسی‌ترین ابزار در زمین‌آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار متغیر در دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد (Journal and Huijbregts, 1978):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن $\gamma(h)$ مقدار نیم‌تغییرنما در فاصله h تعداد $N(h)$ جفت نمونه به ازای فاصله h $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ به ترتیب مقادیر

مورد مطالعه بود. بیشترین مقدار کربن آلی در خاک سطحی در خاک‌های جنگلی (۰/۶۹ درصد) و پایین‌ترین آن در زمین‌های آیش (۰/۴۱ درصد) بود. (Rosemary *et al.*, 2017) با بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک در منطقه گرمسیری سریلانکا نشان دادند که تغییرات مکانی واکنش خاک، شوری و مقدار شن زیاد بود؛ درحالی‌که ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی و رس دارای تغییرات مکانی متوسط بود.

آگاهی از تغییرات مکانی وضعیت کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشاورزی برای مدیریت بهینه اراضی و رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی ضروری است. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه ارزیابی کیفیت خاک در سراسر دنیا انجام گرفته است با این وجود، مطالعات در زمینه تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی خاک در ایران یا محدود است و یا تنها کیفیت خاک را بررسی کردند. از آن جمله می‌توان به مطالعات Shahab *et al.*, (2011) در اراضی کشاورزی و مرتعی منطقه ده شورش واقع در جنوب مشهد در شمال شرق ایران اشاره کرد که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) را با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها ارزیابی کردند و نشان دادند که ۷۸ درصد از خاک‌های مرتعی و ۱۳ درصد خاک‌های کشاورزی دارای توابع توزیع اندازه منافذ مطلوب بودند. Sánchez-Navarro *et al.*, (2015) در پژوهشی در استان مورکیا^۳ در جنوب غرب اسپانیا با استفاده از روش کریجینگ، نقشه شاخص کیفیت خاک نرمال شده (QIN) را با استفاده از حداقل داده‌ها ارائه دادند و نشان دادند که ۱۲، ۳۲، ۱۵، ۱۹ و ۲۲ درصد از منطقه مورد مطالعه به ترتیب دارای کیفیت بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین بود.

Ranjbar *et al.*, (2016) در ۳۰ مزرعه زعفران کاری منطقه قائن خراسان جنوبی، شاخص کیفیت تجمعی (SQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) را با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها ($r=0/44$) مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در مزارع زعفران است. همچنین (Nabiollahi *et al.*, 2017) مکانی کیفیت خاک را در اراضی کشاورزی متأثر از شوری در استان کردستان بررسی کرده و نشان دادند که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از SQI_w ($R^2 = 0/82$) بهتر از SQI_a ($R^2 = 0/78$) و SQI_n ($R^2 = 0/74$) بود. با این روش به ترتیب ۲۸، ۵۹ و ۱۰ درصد منطقه دارای کیفیت خوب، متوسط و پایین بود و استفاده از حداقل داده‌ها را به دلیل صرفه‌جویی در هزینه پیشنهاد دادند.

با پژوهشی در استان قزوین نشان دادند که برای تهیه نقشه کیفیت خاک، مدل شاخص کیفیت تجمعی استفاده از حداقل داده‌ها ($r=0/34$) بهتر از مدل شاخص کیفیت نمورو ($r=0/23$) بود. آن‌ها همچنین نشان دادند که کیفیت خاک از غرب به شرق روند کاهشی داشت. (Rabbi *et al.*, 2014) در پژوهشی در سواحل گنگز بنگلادش نشان دادند که شن، رس و هدایت هیدرولیکی اشباع، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و پایداری خاکدانه‌ها ساختار مکانی بالایی داشتند. همچنین با محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک اراضی کشاورزی مورد مطالعه را از نظر کیفیت به دو بخش "کیفیت فیزیکی خوب" و "کیفیت فیزیکی فقیر" تقسیم کردند. (Karami and Basirat, 2015) با پژوهشی در ۵۰۰۰ هکتار از اراضی دشت ارسنجان استان فارس نشان دادند که بهترین مدل برای نیم‌تغییرنمای مقادیر شوری خاک، pH و درصد رس، مدل نمایی بود و برای درصد سیلت و شن، مدل گوسی و برای کربن آلی خاک، مدل کروی بود. همچنین روش کریجینگ از ارجحیت بیشتری در میان‌یابی مکانی این ویژگی‌ها داشت. (Bijanazadeh *et al.*, 2015) با بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک در شرق شیراز نشان دادند که بهترین مدل برای تهیه نقشه خاک در روش کریجینگ معمولی برای واکنش خاک، درصد اشباع، پتاسیم و نیتروژن، مدل کروی بود و برای درصد‌های شن، سیلت، رس، شوری و فسفر، بهترین مدل نمایی بود.

(Davatgar and Ghasemi, 2016) با بررسی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ۲۰۰۰۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی جنوب تهران با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ نشان دادند که بهترین مدل تغییرنمای برازش داده‌شده برای کربن آلی، واکنش خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و آهک، مدل کروی، برای رس و سیلت، نمایی و برای شن، گوسی بود. (Mirzaee *et al.*, 2016) با بررسی توانایی روش‌های کریجینگ معمولی^۱ (OK)، کریجینگ ساده^۲ (SK) و کوکریجینگ (CK) و روش‌های زمین‌آمار ترکیبی برای پیش‌بینی مقدار کربن آلی خاک در دشت سلین در شمال غربی ایران نشان دادند که مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) بهتر از مدل رگرسیون خطی چندگانه بود و روش‌های زمین‌آمار ترکیبی پیش‌بینی‌های قابل اطمینان‌تر از روش‌های زمین‌آمار کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و کوکریجینگ داشتند. (Bhunia and Maiti, 2016) با بررسی تغییرات مکانی کربن آلی در کاربری‌های مختلف نشان داد که حداکثر مقدار کربن آلی در قسمت شمال غربی و کمترین مقدار آن در قسمت شمال شرقی و مرکزی منطقه

باشد. این پژوهش با هدف تعیین شاخص‌های کیفیت خاک در ابعاد منطقه‌ای و بررسی تغییرپذیری مکانی شاخص‌های کیفیت خاک و ارائه نقشه توزیع مکانی آن‌ها به منظور پیشنهاد روش مناسب برای مدیریت بهتر خاک‌ها انجام شد.

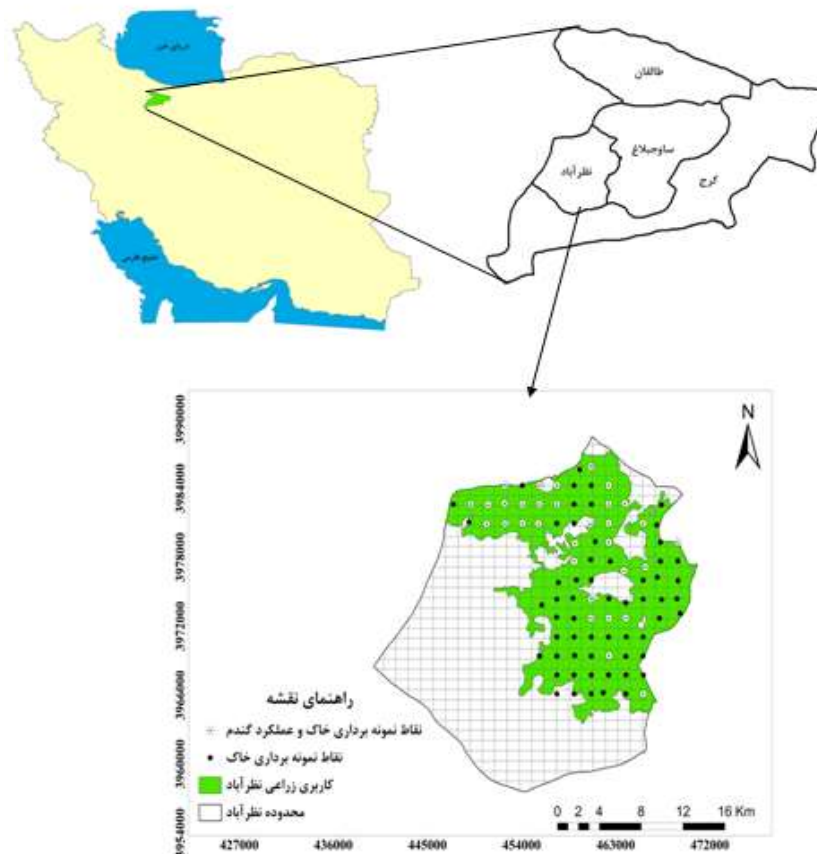
مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه نظرآباد با ۲۶۰۰۰ هکتار اراضی زراعی آبی در موقعیت جغرافیایی طول $35^{\circ} 47' N$ تا $35^{\circ} 1' N$ و عرض $50^{\circ} 23' E$ تا $50^{\circ} 40' E$ در غرب استان البرز قرار دارد. با توجه به شاخص اقلیمی دومارتن، این منطقه با میانگین بارندگی سالانه ۲۳۸ میلی‌متر و میانگین دمای $14/2$ درجه سانتی‌گراد در اقلیم خشک قرار دارد.

(Hamidi Nehrani *et al.*, 2020) در ۷۷ مزرعه در استان زنجان شامل ۲۷ مزرعه آبی و ۵۰ مزرعه دیم با استفاده از توابع امتیازدهی خطی و غیرخطی، شاخص‌های کیفیت تجمعی و تجمعی-وزنی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که شاخص تجمعی با روش امتیازدهی خطی دقت بالاتری برای ارزیابی کیفیت خاک در دو کاربری دیم و آبی داشت و کیفیت خاک در کاربری آبی بالاتر از کاربری دیم بود.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در اکثر آن‌ها تنها به بررسی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به‌عنوان ویژگی‌های کیفی خاک پرداخته شده است و در خصوص تغییرات مکانی کیفیت خاک مطالعات اندکی به صورت منطقه‌ای صورت گرفته است. برای ارزیابی تغییرات کیفیت خاک در ابعاد منطقه‌ای ابتدا باید شاخص کیفی خاک ارائه شود که منعکس‌کننده تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و برهم‌کنش آن‌ها بر کیفیت خاک



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت محل نقاط نمونه‌برداری خاک در استان البرز

شن، سیلت، رس به روش هیدرومتری، پایداری ساختمان خاک به روش الک تر، چگالی ظاهری به روش سیلندر، چگالی حقیقی به روش پیکنومتر، تخلخل خاک از طریق چگالی ظاهری و حقیقی، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم

نمونه‌برداری خاک و تجزیه نمونه‌ها

کل منطقه مورد مطالعه به ۹۵ شبکه مربعی به ابعاد 1650×1650 متر تقسیم شد و از سطح خاک (۳۰-۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری صورت گرفت (شکل ۱). ویژگی‌های فیزیکی شامل

نظر برای محاسبه هر شاخص است. در جدول (۱) انواع شاخص-های کیفیت خاک به کاررفته در این مطالعه و کلاس بندی آنها آمده است.

برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، در نرم افزار SPSS با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مؤلفه‌های اصلی (PC) و ارزش ویژه (EV) تعیین شد. ارزش ویژه، میزان واریانس تبیین شده به وسیله هر عامل را بیان می‌کند و یکی از ضوابط پرکاربرد در تعیین تعداد عامل‌ها است. در تحلیل عاملی، ارزش ویژه برابر یک است؛ یعنی در تحلیل عاملی مؤلفه‌های اصلی که ارزش ویژه آنان کمتر از یک است، به عنوان عامل‌هایی هستند که از نظر آماری معنی دار نیست و باید از تحلیل کنار گذاشته شود. سپس در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بالای یک، ویژگی با بالاترین ضریب بارگذاری انتخاب و ویژگی‌هایی با اختلاف ۱۰ درصد از بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. برای تعیین مناسب بودن داده‌ها برای PCA از ضریب KMO^1 و برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرها از آزمون بارتلت استفاده شد (Jolliffe, 1986). همچنین با توجه به این که ویژگی‌های انتخاب شده دارای واحدهای متفاوتی هستند، به منظور این که بتوان آنها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، ویژگی‌ها باید بدون واحد شوند. برای این منظور از توابع عضویت فازی استفاده شد. با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تبدیل شدند (Qi et al., 2009). در ادامه سهم اشتراک پذیری^۲ هر ویژگی به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به وسیله نرم افزار SPSS انجام شد. سپس نسبت مقدار سهم اشتراک پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، به عنوان وزن هر ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد و وارد معادلات شاخص‌های SQI_A ، SQI_W و NQI شدند و در نهایت یک مقدار به عنوان شاخص کیفیت خاک ارائه شد (Qi et al., 2009).

تحلیل آماری داده‌ها

مهمترین آماره‌های توصیفی شامل شاخص‌های موقعیت توزیع (میانگین)، شاخص‌های پراکنش و شکل توزیع (واریانس، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات) به کمک نرم افزار SPSS (version, 24) مشخص شدند. از آزمون معنی دار بودن چولگی و آزمون

به وسیله صفحات فشاری، آب قابل استفاده از طریق رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (برای نمونه‌های با بافت متوسط) و بار افتان (برای نمونه‌های با بافت سنگین) (Aria and Mirkhani, 2005) و ویژگی‌های شیمیایی شامل شوری عصاره اشباع به وسیله EC متر، واکنش گل اشباع به وسیله pH سنج، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Page et al., 1982)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1954) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، سدیم محلول خاک به وسیله دستگاه فلیم فتومتر و مقدار کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره اشباع خاک توسط روش کمپلکسومتری و از طریق تیتراسیون با EDTA در حضور معرف‌های اریوکروم بلاک تی و موروکساید، اندازه گیری و نسبت جذب سدیم (SAR) محاسبه شد (Page et al., 1982). تنفس میکروبی خاک با اندازه گیری دی اکسید کربن آزاد شده از ۲۵ گرم خاک مرطوب در مدت هفت روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد (Horwath and Paul, 1994).

تعیین شاخص‌های کیفیت خاک

شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی ساده (SQI_A) و وزنی (SQI_W) و کیفیت نمورو (NQI) (Doran and Parkin, 1996) به ترتیب از روابط زیر به دست آمدند:

$$SQI_W = \sum_{i=1}^n S_i W_i \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$SQI_A = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن‌ها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است (۲۰). شاخص کیفیت نمورو (NQI) از رابطه زیر به دست آمد:

که در آن‌ها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است. شاخص کیفیت نمورو (NQI) از رابطه زیر به دست آمد:

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ava}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن: P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد

محاسبات نیم‌تغییرنما، داده‌هایی که در بیشتر یا کمتر از چهار برابر انحراف معیار قرار داشتند، به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند. بعد از این مرحله، بررسی وجود روند در هر متغیر نسبت به فواصل نمونه‌برداری در هریک از جهت‌های اصلی به‌طور جداگانه رسم و با استفاده از برازش مدل‌های خطی و درجه دو مورد بررسی قرار گرفتند.

توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف برای تشخیص نرمال بودن داده‌ها استفاده شد. چرا که شرط استفاده از کریجینگ آن است که متغیر دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت باید از روش کریجینگ غیرخطی استفاده و یا به نحوی توزیع متغیر نرمال شود. پیش از استفاده از روش‌های درون‌یابی آمار مکانی برای هر متغیر، آزمون داده‌های پرت، روند و غیرهمسان‌گردی انجام شدند. برای یافتن داده‌های پرت و جداسازی آن‌ها برای

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک (Qi et al., 2009)

کلاس کیفیت خاک					روش انتخاب ویژگی	شاخص
خیلی پایین (V)	پایین (IV)	متوسط (III)	خوب (II)	خیلی خوب (I)		
< ۰/۲۴	۰/۲۴ - ۰/۳۱	۰/۳۱ - ۰/۳۸	۰/۳۸ - ۰/۴۴	> ۰/۴۴	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	NQI
< ۰/۲۷	۰/۲۷ - ۰/۳۴	۰/۳۴ - ۰/۴۱	۰/۴۱ - ۰/۴۸	> ۰/۴۸	کل ویژگی‌ها (TDS)	
< ۰/۴۰	۰/۴۰ - ۰/۵۰	۰/۵۰ - ۰/۶۰	۰/۶۰ - ۰/۷۰	> ۰/۷۰	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	SQI _a
< ۰/۴۱	۰/۴۱ - ۰/۵۱	۰/۵۱ - ۰/۶۱	۰/۶۱ - ۰/۷۱	> ۰/۷۱	کل ویژگی‌ها (TDS)	
< ۰/۳۹	۰/۳۹ - ۰/۴۹	۰/۴۹ - ۰/۵۹	۰/۵۹ - ۰/۶۹	> ۰/۶۹	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	SQI _w
< ۰/۴۲	۰/۴۲ - ۰/۵۲	۰/۵۲ - ۰/۶۲	۰/۶۲ - ۰/۷۲	> ۰/۷۲	کل ویژگی‌ها (TDS)	

شاخص‌های کیفیت خاک از روش کریجینگ معمولی Ordinary (Kriging) و برای پهنه‌بندی توزیع مکانی بافت خاک از روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) استفاده شد. در این تحقیق همه ویژگی‌ها از یک مدل نیم‌تغییرنمای سقف‌دار پیروی کرد و در نتیجه از تخمین‌گر کریجینگ برای همه آن‌ها استفاده شد.

ارزیابی دقت مدل‌های زمین‌آماري

برای ارزیابی دقت برآورد مدل‌های زمین‌آماري، از آماره‌های میانگین مطلق خطا (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R²) و میانگین اُریب خطا (MBE) استفاده شد. این آماره‌ها عبارت‌اند از:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$NRMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{Z} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - \bar{Z}(x_i)]^2} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)] \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن؛ $Z^*(x_i)$ مقدار تخمینی متغیر مورد نظر در نقطه x_i ، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌شده متغیر در نقطه x_i ، \bar{Z} مقدار میانگین متغیر و n تعداد نقاط است. مفهوم میانگین خطا، اریب بودن یا

بررسی تغییرات مکانی

برای تبدیل نقاط به پهنه دو مرحله واریوگرافی و تخمین وجود دارد. در مرحله اول، ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای مدل‌سازی شد. برای این منظور از نیم‌تغییرنما استفاده شد. در مرحله بعدی با استفاده از مؤلفه‌های موجود، تخمین متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده انجام گرفت. برای مدل‌سازی نیم‌تغییرنما از نرم‌افزار GS+ (Version 5.1) استفاده شد. ویژگی‌هایی که دارای توزیع نرمال بودند، فرآیند نرمال‌سازی داده‌ها انجام نشد. ولی اگر توزیع داده‌ها نرمال نبود، حتماً تبدیل داده‌ها انجام شد. سپس برازش مدل نیم‌تغییرنما بر داده‌های تبدیل یافته انجام گرفت. برای ارزیابی بهترین برازش مدل‌های تئوری (خطی، نمایی، کروی و یا گوسی) بر نیم‌تغییرنمای تجربی از آماره‌های مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و ضریب تبیین (R²) استفاده شد. آماره RSS نشان‌دهنده انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر واقعی می‌باشد و هر چه RSS کوچکتر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار است. بعد از برازش مدل‌ها به نیم‌تغییرنما، از سه پارامتر مدل یعنی واریانس قطعه‌ای، دامنه و آستانه برای پی‌بردن به سرشت تغییرپذیری و قدرت ساختار مکانی شاخص‌ها استفاده شد. (Sun et al., 2003; Schönig et al., 2006). برای تعیین وابستگی مکانی شاخص‌های کیفیت خاک از شاخص نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه استفاده شد. بر این اساس مقادیر وابستگی مکانی کم‌تر از ۲۵ درصد، ۲۵-۷۵ و بیشتر از ۷۵ به ترتیب نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی، متوسط و ضعیف متغیر در منطقه بیان شد (Trangmar et al., 1986). برای پهنه‌بندی توزیع مکانی

جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با توجه به میانگین رس (۲۵ درصد)، سیلت (۳۰ درصد) و شن (۴۵ درصد) در نمونه‌ها، خاک‌های منطقه غالباً دارای بافت لوم و لوم رسی هستند. pH خاک‌های منطقه در محدوده ۸/۴۷-۷/۲۲ و میانگین آن حدود ۸ است. نظر به اینکه pH مطلوب برای رشد گندم (کشت غالب منطقه) ۷ است (Sys et al., 1993)، لذا pH خاک کشتزارهای منطقه بالاتر از حد مطلوب برای رشد گندم قرار دارد. با توجه به میانگین آهک (۱۶/۱۹)، منطقه مورد مطالعه دارای خاک آهکی می‌باشد. از طرفی، با توجه به نتایج جدول (۲)، خاک‌های منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار آهن، روی، منگنز، بر، مس، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، شوری و سدیمی بودن کمبودی برای رشد گندم ندارد. به دلیل ماده آلی پایین، منطقه مورد مطالعه از نظر پایداری ساختمان و آب قابل دسترس، ضعیف و دارای محدودیت است.

مؤلفه‌های اصلی کیفیت خاک

جدول (۳) نتایج آزمون بارتلت و KMO را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نتایج مقادیر KMO بالاتر از ۰/۷ و آزمون بارتلت نیز در سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار است، داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و انتخاب حداقل ویژگی‌ها مناسب هستند.

نبودن تخمین را نشان می‌دهد و اگر به صفر میل کند، روش ناریب است. مفهوم RMSE صحت پیش‌بینی را نشان می‌دهد و هر چه RMSE کوچک‌تر باشد، صحت تخمین بیشتر خواهد بود (Mohammadi, 2006). مقدار RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری ویژگی است و مقایسه مقدار آن برای ویژگی‌ها و روش‌های مختلف درون‌یابی درست نخواهد بود. از این رو با تقسیم مقدار RMSE به میانگین ویژگی، NRMSE به دست می‌آید. مقدار NRMSE نرمال برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰ درصد است. NRMSE در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد، ۲۰ تا ۳۰ درصد و بیشتر از ۳۰ درصد به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت مناسب، متوسط و عدم اطمینان به برآورد روش درون‌یابی است. ضریب تبیین (R^2) شاخصی از تشریح تغییرات متغیر وابسته به وسیله متغیر مستقل است و هر چه به عدد یک نزدیک باشند، نشانگر مناسب بودن نیکویی برازش توسط مدل است. آماره MBE میانگین خطا یا اریب است که هر چه به صفر نزدیک باشد صحت برآورد بیشتر است. مقادیر مثبت و منفی آن به ترتیب نشان‌دهنده بیش‌برآورد و کم‌برآورد است (Pham, 2019).

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشتزارها

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نمونه‌های اندازه‌گیری شده (n=۹۵)

ویژگی‌های خاک	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی
(/) Sand	۱۶/۵۰	۹۲/۰۰	۴۵/۴۰	۱۸/۷۱	۰/۵۶	-۰/۵۰
(/) Silt	۱/۵	۴۸/۵۰	۲۹/۵۲	۱۱/۳۵	-۰/۸۴	-۰/۱۳
(/) Clay	۳/۰۰	۴۵/۰۰	۲۵/۰۶	۹/۲۳	۰/۰۹	-۰/۴۳
(g.cm ⁻³) BD	۱/۲	۱/۷۲	۱/۴۵	۰/۱۲	۰/۰۸	-۰/۲۸
(/) F	۲۵/۲۳	۵۴/۳۷	۴۵/۵۷	۴/۳۰	-۰/۲۱	-۰/۱۸
(cm) MWD	۰/۰۰	۲/۴۸	۰/۶۴	۰/۴۵	۰/۹۷	۲/۰۷
(/) AW	۴/۹۴	۱۹/۸۹	۱۲/۲۸	۳/۰۶	-۰/۱۱	-۰/۰۷
(m.day ⁻¹) Ks	-۰/۰۰۱	۴/۸۹	۰/۷۷	۰/۹۵	۱/۹۱	۴/۰۶
pH	۷/۲۲	۸/۴۷	۷/۹۷	۰/۲۳	-۱/۰۴	۱/۸۶
(dS/m) EC	۰/۵۶	۱۸/۱۶	۲/۶۸	۲/۸۳	۲/۷۵	۹/۸۴
(/) OM	۰/۴۶	۴/۶۸	۱/۶۱	۰/۳۵	۱/۵۰	۵/۶۹
(/) TNV	۷/۷	۳۴/۶	۱۶/۱۹	۴/۳۵	۰/۶۹	۳/۱۱
SAR	۰/۴۸	۲۱۷	۵/۵۲	۲/۰۷	۹/۵۶	۲۹/۵۱
(mg.kg ⁻¹) P _{ava}	۳/۰۰	۱۷۴/۰	۲۷/۵۱	۳۳/۲۴	۲/۲۱	۴/۸۸
(mg.kg ⁻¹) K _{ava}	۱۳۵	۱۴۵۵	۴۳۶/۰۱	۲۳۷/۷۰	۱/۷۶	۴/۴۴
(mg.kg ⁻¹) Fe	۱/۷۰	۱۷/۳۶	۵/۸۲	۲/۴۸	۱/۲۴	۳/۶۴
(mg.kg ⁻¹) Cu	۰/۶۲	۳/۳۸	۱/۷۴	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۳۵
(mg.kg ⁻¹) Mn	۲/۵۶	۲۲/۲۲	۹/۰۴	۳/۷۴	۱/۲۹	۱/۹۵
(mg.kg ⁻¹) B	۰/۰۰	۱۹/۸۹	۲/۷۵	۲/۵۵	۴/۸۲	۲۸/۳۷
(mg.kg ⁻¹) Zn	۰/۲۲	۴/۹۲	۱/۲۱	۱/۰۱	۱/۸۶	۳/۳۶
(mg CO ₂ . day ⁻¹ .g ⁻¹) SMR	۰/۳۰۷	۱/۷۹	۰/۹۲	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۴۸

حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند و رس و آب قابل استفاده در مؤلفه اول، روی در مؤلفه دوم و کربنات کلسیم معادل در مؤلفه ششم با ضریب بارگذاری بالا، تا ۱۰ درصد کمتر از بالاترین ضریب بارگذاری مؤلفه‌های مربوط نیز به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. *Juhos et al.*, (2015) نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۷۶ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند.

جدول ۳- تست بارتلت و KMO

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	
۰/۷۲	
۲۱۰۲/۴	آماره کای اسکوار ^۱
۲۱۰	درجه آزادی
۰/۰۰۰۱	معنی‌داری

جدول (۴) مقادیر ارزش ویژه (EV)، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب‌شده را در مؤلفه‌های منتخب نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، شش مؤلفه دارای مقدار ارزش ویژه (EV) بزرگ‌تر از یک هستند و استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۷۶ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند. در مؤلفه اول با ارزش ویژه ۶/۰۶، شش با بالاترین ضریب بارگذاری ۰/۹۰-، مؤلفه دوم با ارزش ویژه ۳/۱۷، فسفر قابل استفاده با ضریب بارگذاری ۰/۷۷-، مؤلفه سوم با ارزش ویژه ۲/۴۸، چگالی ظاهری با ضریب بارگذاری ۰/۶۶-، مؤلفه چهارم با ارزش ویژه ۱/۷۷، تخلخل با ضریب بارگذاری ۰/۶۳-، مؤلفه پنجم با ارزش ویژه ۱/۳۱، نسبت جذبی سدیم با ضریب بارگذاری ۰/۶۳-، مؤلفه ششم با ارزش ویژه ۱/۱۶، بر با ضریب بارگذاری ۰/۶۰-، با بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به‌عنوان

جدول ۴- مقادیر ارزش ویژه، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب‌شده در مؤلفه‌ها

مؤلفه‌ها					
۱	۲	۳	۴	۵	۶
۶/۰۶	۳/۱۷	۲/۴۸	۱/۷۷	۱/۳۱	۱/۱۶
۲۸/۸۴	۴۳/۹۳	۵۵/۷۴	۶۴/۱۹	۷۰/۴۴	۷۵/۹۷
	۰/۷۷				
	۰/۷۱				
۰/۸۱					
					۰/۵۹
					۰/۶۰
				۰/۶۳	
		۰/۵۷	۰/۶۶		
		۰/۶۳			
۰/۸۵					
-۱/۹۰					

تغییرات شاخص‌های کیفیت خاک

جدول (۵) وضعیت کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه نظرآباد با استفاده از شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI)، تجمعی ساده (SQI_a) و وزنی (SQI_w) در کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های انتخاب‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، منطقه نظرآباد دارای طیف وسیعی از شاخص‌های کیفیت خاک از خیلی پایین تا خیلی خوب است. با توجه به مقادیر میانه در شاخص‌های NQI، SQI_a و SQI_w در روش استفاده از حداقل داده‌ها (به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۶۵ و ۰/۶۵) و کل داده‌ها (به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۶۳ و ۰/۶۴) و همچنین جدول طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک (جدول ۱)، ۵۰ درصد از منطقه نظرآباد در کلاس خوب و خیلی خوب

قرار دارد. همچنین در هر سه شاخص کیفیت خاک در روش استفاده از کل داده‌ها، مقدار کمینه افزایش و مقدار بیشینه کاهش یافته است لذا محدوده کیفیت خاک نسبت به روش استفاده از کل داده‌ها کمتر می‌شود. به‌طوری‌که بیشترین تغییرات محدوده کیفیت خاک را شاخص SQI_w حاصل از حداقل ویژگی‌ها (MDS) با مقادیر کمینه (۰/۲۱) و بیشینه (۰/۸۵) داشت (جدول ۵).

تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول، تمام شاخص‌های بررسی‌شده دارای وابستگی مکانی متوسط (با نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه بین ۲۵ تا ۷۵ درصد) هستند. لذا کیفیت خاک منطقه تحت تأثیر توأم عوامل ذاتی (مانند نوع خاک، مواد مادری و شرایط زهکشی

(جدول ۷).

نتایج ارزیابی معیارهای خطا (جدول ۸) نشان داد که برای تهیه نقشه کیفیت خاک در منطقه، استفاده از شاخص‌های SQI_w ، SQI_a و NQI با به کارگیری حداقل ویژگی‌ها، از دقت نسبتاً زیادی در مقایسه با استفاده از کل ویژگی‌های خاک برخوردار است. همچنین با توجه به نتایج آماره‌های MBE (۰/۱۱)، R^2 (۰/۸۹)، $NRMSE$ (۰/۱) و MAE (۰/۰۹)، در بین شاخص‌های مورد بررسی، شاخص SQI_w با استفاده از حداقل ویژگی‌ها از دقت بالاتری نسبت به SQI_a و NQI برخوردار است. در همین رابطه، *Ranjbar et al.*, (2016) بررسی کیفیت خاک در منطقه قائن خراسان جنوبی نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها ($r=0/44$)، مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در مزارع زعفران است.

منطقه) و بیرونی (مانند مدیریت زراعت و کوددهی) است (Sun *et al.*, 2003). نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش یافته برای شاخص‌های SQI_w ، SQI_a و NQI با استفاده از کل داده‌ها، مدل گوسی است (با R^2 بیشتر و RSS کمتر) و برای شاخص‌های SQI_w و SQI_a با استفاده از حداقل داده‌ها، مدل نمایی است و مدل کروی برای شاخص NQI حاصل از حداقل داده‌ها بهترین برازش را داشت. همچنین بر اساس مدل‌های بیان شده، دامنه وابستگی مکانی در شاخص‌های کیفیت خاک متفاوت بوده و محدوده وابستگی مکانی برای شاخص‌های SQI_w ، SQI_a و NQI به ترتیب ۸-۹ کیلومتر، ۹-۱۰ کیلومتر و ۱۰-۱۱/۵ کیلومتر می‌باشد. مقادیر کشیدگی و چولگی شاخص‌های کیفیت خاک نشان می‌دهد که مقادیر داده‌های به دست آمده، نرمال هستند. همچنین نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز مؤید همین مطلب است

جدول ۵- وضعیت کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه

شاخص کیفیت خاک	روش انتخاب ویژگی	کمینه	بیشینه	میانگین	میانه
NQI	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۴۲
	کل ویژگی‌ها (TDS)	۰/۲۹	۰/۵۳	۰/۴۲	۰/۴۳
SQI_a	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	۰/۳۰	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۶۵
	کل ویژگی‌ها (TDS)	۰/۴۳	۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۶۳
SQI_w	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	۰/۲۱	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۶۵
	کل ویژگی‌ها (TDS)	۰/۴۰	۰/۸۱	۰/۶۲	۰/۶۴

جدول ۶- مؤلفه‌های نیم تغییرنماهای برازش یافته

شاخص	روش	مدل	اثر قطعه‌ای (C_0)	آستانه (C_0+C)	دامنه تأثیر (A_0)	R^2	RSS	کلاس وابستگی مکانی (C_0/C_0+C)*100	کشیدگی	چولگی
SQI_w	MDS	نمایی	۰/۰۱۴	۰/۰۲۷	۱۰۰۰۰	۰/۹۵	$4/04 \times 10^{-8}$	۰/۴۹	۰/۰۷	۰/۶۴
	TDS	گوسی	۰/۰۰۶	۰/۰۱۰	۹۰۰۰	۰/۹۶	$7/41 \times 10^{-7}$	۰/۴۰	۰/۵۹	۰/۳۴
SQI_a	MDS	نمایی	۰/۰۰۸	۰/۰۱۶	۸۰۰۰	۰/۹۴	$1/88 \times 10^{-6}$	۰/۵۰	۰/۰۵	۰/۴۶
	TDS	گوسی	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۹۰۰۰	۰/۹۵	$5/52 \times 10^{-7}$	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۳۴
NQI	MDS	کروی	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۱۱۵۰۰	۰/۹۰	$6/06 \times 10^{-7}$	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۴۵
	TDS	گوسی	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۱۰۰۰۰	۰/۹۶	$1/10 \times 10^{-7}$	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۳۳

جدول ۷- آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف در شاخص‌های کیفیت خاک

آماره	شاخص‌های کیفیت خاک					
	کل ویژگی‌های خاک			حداقل ویژگی‌های خاک		
	NQI	SQI_a	SQI_w	NQI	SQI_a	SQI_w
آزمون کولموگروف-اسمیرنوف	۰/۷۱	۰/۶۷	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۹۸
مقدار احتمال (p-Value)	۰/۷۰	۰/۷۶	۰/۳۹	۰/۴۴	۰/۶۴	۰/۲۹

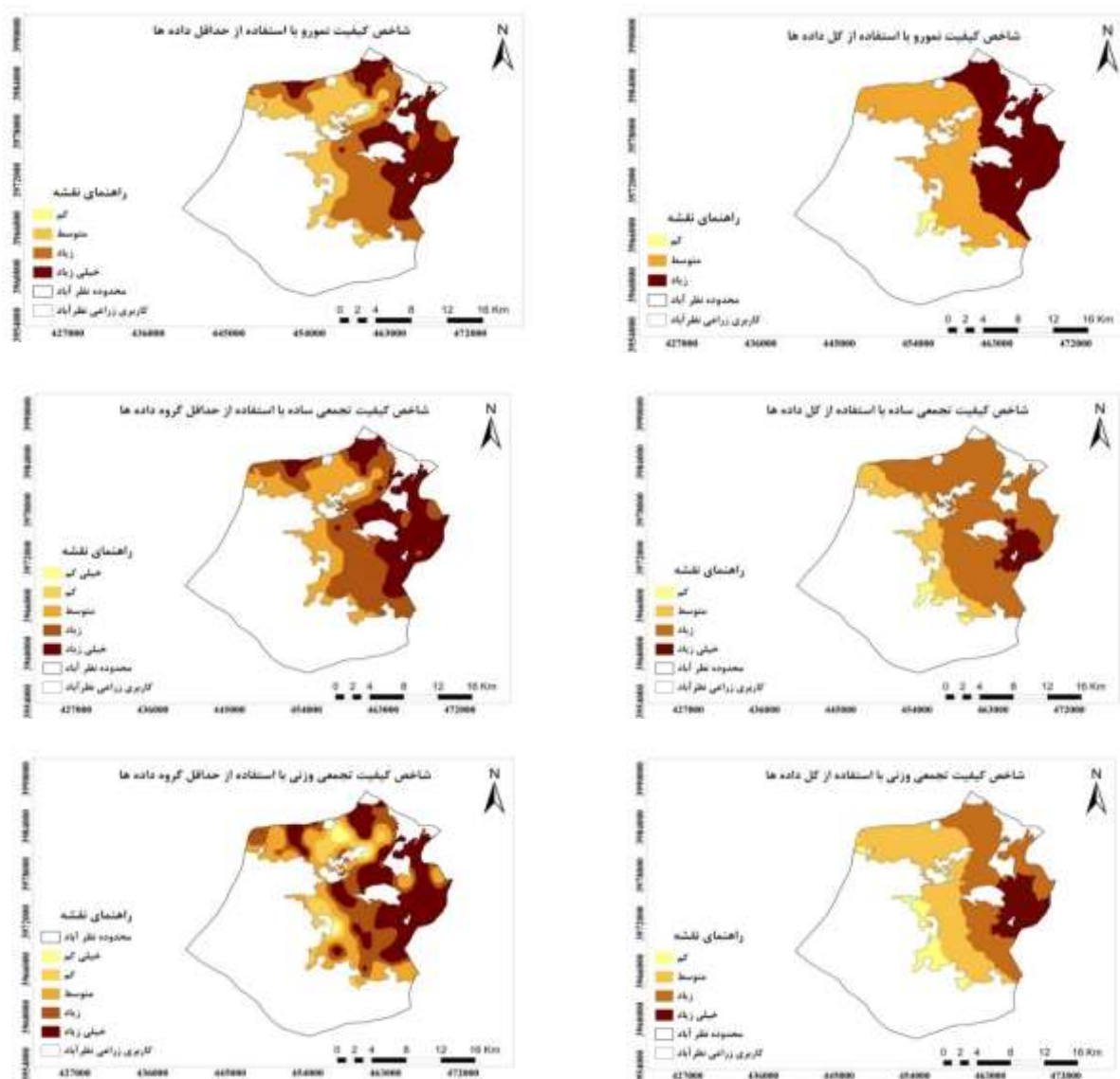
جدول ۸- آماره‌های ارزیابی دقت روش کربجینگ معمولی در برآورد شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس حداقل داده‌ها (MDS) و کل داده‌ها (TDS) در منطقه

مورد مطالعه						
شاخص	روش	MBE	R^2	NRMSE	MAE	
SQI_w	MDS	۰/۱۱	۰/۸۹	۰/۱	۰/۰۹	
	TDS	۰/۲۴	۰/۶۹	۴/۵	۰/۹۵	
SQI_a	MDS	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۳۰	۱/۲۲	
	TDS	۰/۵۱	۰/۷۲	۲/۸	۰/۵۷	
NQI	MDS	۰/۱۲	۰/۶۵	۱۰/۹	۰/۳۰	
	TDS	۰/۷۵	۰/۸۱	۱۲/۸	۱/۰۲	

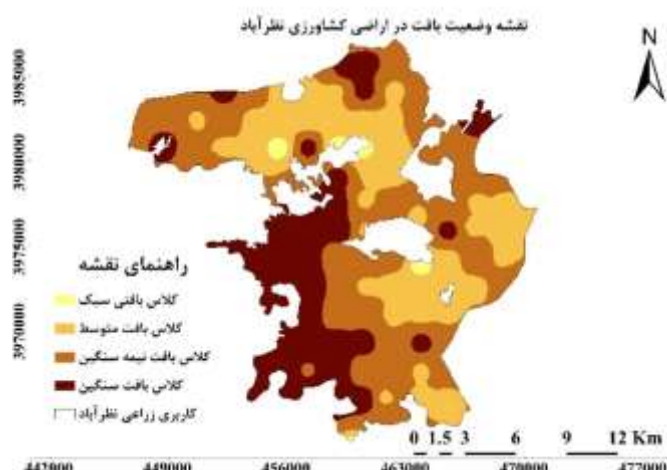
روند تغییرات بافت خاک با روند تغییرات کیفیت خاک منطقه همخوانی دارد. با توجه به نقشه‌های کیفیت خاک (شکل ۲)، روند کاهش کیفیت خاک از شرق به غرب منطقه مورد مطالعه کاملاً مشهود است. لذا با توجه به شکل‌های (۲) و (۳)، غرب منطقه نظرآباد با بافت رسی و لوم رسی دارای کیفیت پایین و شرق منطقه با بافت لومی دارای کیفیت خوبی می‌باشد. در پژوهشی (Rahmanipour *et al.*, 2014) با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی و نمودار، نقشه کیفیت منطقه قزوین را بررسی کردند و نشان دادند که کیفیت خاک منطقه قزوین در غرب نظرآباد از غرب به شرق روند کاهشی داشت که با روند کاهشی شرق به غرب منطقه نظرآباد در این تحقیق مطابقت دارد و نشان می‌دهد که منطقه بین نظرآباد و قزوین به دلیل بافت رسی و لوم رسی، دارای کیفیت پایینی است.

توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

شکل (۲) نقشه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک را در منطقه نظرآباد نشان می‌دهد. کیفیت خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد. ویژگی‌های شیمیایی جزء ویژگی‌هایی می‌باشد که مقادیر آن‌ها وابسته به عوامل مدیریتی می‌باشد. لذا روند تغییرات آن‌ها لزوماً با روند تغییرات کیفیت خاک می‌تواند همخوانی نداشته باشد ولی با توجه به تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شده است. با توجه به اینکه بافت خاک از ویژگی‌های پایدار خاک می‌باشد و در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مقدار شن و رس با ضریب بارگذاری ۰/۸۵- و ۰/۱۵- مؤثرترین ویژگی در کیفیت خاک منطقه انتخاب شده‌اند، لذا تغییرات مکانی بافت خاک بررسی شد و نتایج نشان داد که



شکل ۲- نقشه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در منطقه نظرآباد



شکل ۳- نقشه وضعیت بافت خاک در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه

تأثیر بافت، آب قابل استفاده، کربنات کلسیم معادل، فسفر قابل استفاده، چگالی ظاهری، تخلخل، نسبت جذب سدیم، بر و روی است و از غرب به شرق منطقه روند کاهشی دارد. کیفیت خاک متأثر از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد. با توجه به اینکه بافت خاک از ویژگی‌های پایدار خاک می‌باشد و در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مقدار شن و رس با ضریب بارگذاری ۰/۹۰- و ۰/۸۵- مؤثرترین ویژگی در کیفیت خاک منطقه انتخاب شده‌اند لذا تغییرات مکانی بافت خاک بررسی شد و نتایج نشان داد که روند تغییرات بافت خاک با روند تغییرات کیفیت خاک منطقه همخوانی دارد. به طوری که در غرب منطقه به دلیل وجود خاک-های با بافت لوم و لوم شنی، کیفیت خاک خوب است اما در شرق منطقه به دلیل وجود خاک‌های با بافت رسی و لوم رسی، کیفیت خاک کشتزارها پایین است. ارزیابی درجه تغییرپذیری مکانی شاخص‌های کیفیت تجمعی و نمودار نشان داد که شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه دارای وابستگی مکانی متوسط هستند. کیفیت خاک منطقه تحت تأثیر توأم عوامل ذاتی و بیرونی (مانند مدیریت زراعت و کوددهی) است. از این رو با انتخاب روش مدیریتی مناسب مانند کوددهی مناسب و افزودن ماده آلی می-توان کیفیت خاک کشتزارها را بالا برد.

با توجه به نتایج جدول (۴)، شن و رس به ترتیب با ضریب بارگذاری ۰/۸۵- و ۰/۹۰- مهمترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در منطقه هستند. شکل (۳) نقشه تغییرات بافت خاک در اراضی کشاورزی نظرآباد را نشان می‌دهد. بر این اساس، بخش غرب و جنوب غربی نظرآباد که دارای کیفیت پایینی است، دارای بافت سنگین (رسی) و نیمه سنگین (لوم رسی و لوم رسی شنی) است و شرق و شمال شرق منطقه مورد مطالعه که دارای کیفیت بالایی است، دارای بافت متوسط (لوم) و سبک (لوم شنی) می-باشد. لذا نقشه کیفیت خاک با نقشه وضعیت بافت خاک مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای منطقه نظرآباد در غرب استان البرز انجام شد. نتایج نشان داد که برای تهیه نقشه کیفیت خاک در کشتزارهای منطقه، شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) با استفاده از حداقل ویژگی‌ها مناسب‌تر است. بهترین مدل زمین-آماری برازش‌یافته بر داده‌های مکانی شاخص SQI_w حاصل از حداقل داده‌ها، مدل نمایی ($R^2=0/95$) با دامنه تأثیر ۱۰ کیلومتر و RSS برابر $10^{-8} \times 4/04$ است. کیفیت خاک در منطقه تحت

REFERENCES

- Aria, P. and Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin*, Soil and Water Research Institute, Iran No: 479. (In Persian)
- Asghari, Sh., Dizajghoorbani Aghdam, S., Esmali Ouri, A. (2015). Investigation the spatial variability of some soil physical quality indices in fandoghluou region of Ardabil using geostatistics. *Journal of Water and Soil*, 28(6), 1271-1283.
- Bhunia, G. S. and Maiti, R. (2016). Spatial variability of soil organic carbon under different land use using radial basis function (RBF). *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 17.
- Bijanazadeh, E., Mokarram, M., and Naderi, R. (2015). Applying spatial geostatistical analysis models for evaluating variability of soil properties in eastern Shiraz, Iran. *Iran Agricultural Research*, 33(2), 35-46.
- Corwin, D. L., Lesch, S. M., Oster, J. D., and Kaffka, S. R. (2006). Monitoring management-induced

- spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 131(3), 369-387.
- Davatgar, N. and Ghasemi, Sh. (2016). Spatial variability and mapping of some physico-chemical properties in surface soils and Influence of land use management on them in agricultural lands south of Tehran. *Iranian Journal of Soil Research*, 30(2), 215-226.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. Methods for assessing soil quality/editors, John W. Doran and Alice J. Jones; editor-in-chief SSSA, Jerry M. Bigham; managing editor, David M. Kral; associate editor, Marian K. Viney.
- Douaik, A., Meirvenne, V., & Tóth, T. (2011). Statistical Methods for the analysis of soil spatial and temporal variability. *Principles, Application and Assessment in Soil Science*, London: IntechOpen, 279-308.
- Girei, A. H., Abdu, N., and Abdulkadir, A. (2016). Temporal Variability of Soil Physico-chemical Properties under a Long-term Fertilizer Trial at Samaru, Northern Guinea Savanna of Nigeria. *International Journal of Plant and Soil Science*, 9(6), 1-10.
- Hamidi Nehrani, S., Askari, M. S., Saadat, S., Delavar, M. A., Taheri, M., and Holden, N. M. (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological Indicators*, 108, 105770.
- Hasanipak, A. (1998). Geostatistics. Tehran University. Press, 314 p.
- Horwath, W. R. and Paul, E. A. (1994). Microbial biomass methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science Society of America Book Series. 5, 753-773.
- Jolliffe, I. T. (1986). Principal components in regression analysis. In *Principal component analysis* (pp. 129-155). Springer, New York, NY.
- Journel, A. G., and Huijbregts, C. J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic press.
- Juhos, K., Szabó, S. and Ladányi, M. (2015). Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach, *International Agrophysics*, 29, 433-440.
- Karami, A. and Basirat, S. (2015). Geostatistical assessment of spatial variability of some surface soil properties in Arsenjan plain. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(1), 59-69.
- Komnitsas, K., Guo, X., and Li, D. (2010). Mapping of soil nutrients in an abandoned Chinese coal mine and waste disposal site. *Minerals Engineering*, 23(8), 627-635.
- Liu, J., Wu, L., Chen, D., Li, M., and Wei, C. (2017). Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China. *Applied Soil Ecology*, 113, 29-35.
- Liu, X., Zhao, K., Xu, J., Zhang, M., Si, B., and Wang, F. (2008). Spatial variability of soil organic matter and nutrients in paddy fields at various scales in southeast China. *Environmental Geology*, 53(5), 1139-1147.
- Mirzaee, S., Ghorbani-Dashtaki, S., Mohammadi, J., Asadi, H., and Asadzadeh, F. (2016). Spatial variability of soil organic matter using remote sensing data. *Catena*, 145, 118-127.
- Mohammadi, J. (2006). *Pedometer (Spatial Statistics)*, Published Pelk, Tehran, Iran.
- Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., and Moradian, S. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 83, 482-494.
- 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 Circ. 939. US Gov. Print. Office, Washington, DC. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. US Gov. Print. Office, Washington, DC.*
- Page, A. L., Miller, R. H. and Keeney, D. R. (1982). Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*. Madison, WI.
- Pham. H. (2019). A New Criterion for Model Selection. *Mathematics*, 7, 1215; doi: 10.3390/math7121215
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., and Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3), 325-334.
- Rabbi, S. M. F., Roy, B. R., Miah, M. M., Amin, M. S., and Khandakar, T. (2014). Spatial variability of physical soil quality index of an agricultural field. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014, 1-10.
- Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., and Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40, 19-26.
- Ranjbar, A., Emami, H., Khorasani, R., and Karimi Karoyeh, A. R. (2016). Soil Quality Assessments in Some Iranian Saffron Fields. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(3), 865-878.
- Risser, P. G. (1991). Long-term ecological research: an international perspective.
- Rosemary, F., Indraratne, S. P., Weerasooriya, R., and Mishra, U. (2017). Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena*, 150, 53-61.
- Sanaeinejad, S. H., Astaraei, A.R., Ghaemi, M., Siabi, N. (2010). An Investigation into spatial data variation by using geostatistics methods for soil studies. The First International Conference on Plant, Water, Soil and Weather Modeling, Chamran University. Kerman, Iran.
- Sánchez-Navarro, A., Gil-Vázquez, J. M., Delgado-Iniesta, M. J., Marín-Sanleandro, P., Blanco-Bernardeau, A., and Ortiz-Silla, R. (2015).

- Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena*, 131, 35-45.
- Schöning, I., Totsche, K. U., and Kögel-Knabner, I. (2006). Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. *Geoderma*, 136(3-4), 631-642.
- Shahab H., Emami H., Haghnia Gh., and Karimi A. (2011). Determining most Important Properties for Soil Quality Indices of Agriculture and Range Lands in a some Parts of Southern Mashhad. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1197-1205.
- Sun, B., Zhou, S., and 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.
- SYS, C., Van Ranst, E., and Debaveye, J. (1993). Land evaluation. Part III: crop requirements. General Administration for Development cooperation, *Agricultural publication*, 7, Brussels Belgium 199 pp.
- Theodossiou, N., and Latinopoulos, P. (2006). Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling and Software*, 21(7), 991-1000.
- Trangmar, B. B., Yost, R. S., and Uehara, G. (1986). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy*, 38, 45-94
- Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.
- Xin-Zhong, W., Guo-Shun, L., Hong-Chao, H., Zhen-Hai, W., Qing-Hua, L., Xu-Feng, L., and Yan-Tao, L. (2009). Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2), 168-175.