توزیع مکانی کیفیت خاک در اراضی زراعی منطقه ساوجبلاغ استان البرز

رسول میرخانی[۱]، علی‌رضا واعظی[۲] *، حامد رضایی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۹ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۸/۱۴)

چکیده

آگاهی از توزیع مکانی کیفیت خاک، از مهم‌ترین موضوعات در شناسایی، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری از منابع خاک است. در این مطالعه، نمونه‌های خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) از ۵۰ کشتزار (۱۶۵۰ m × ۱۶۵۰ m) در منطقه ساوجبلاغ استان البرز برداشت گردید و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شد. کل متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک استخراج، و کمترین متغیرها با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب شدند. معیارهای کیفیت خاک شامل کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) و تجمعی ساده (SQI_a) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) با استفاده از کل ویژگی‌ها (TDS) و کمترین ویژگی‌ها (MDS) تعیین شدند. تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت با استفاده از روش زمین‌آمار تحلیل و توزیع مکانی آنها با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش یافته برای شاخص NQI با استفاده از کمترین ویژگی‌ها مدل گوسی (R^2=۰/۹۳)، و برای بقیه شاخص‌ها با استفاده از کمترین ویژگی‌ها و کل ویژگی‌ها، مدل نمایی (R^2=۰/۷۹-۰/۹۹) بود. همچنین، دامنه تغییرات مکانی برای شاخص‌های SQI_a، SQI_W و NQI به ترتیب ۶/۲-۶ ، ۳/۶۵-۲/۷ و ۷/۲-۴/۵ کیلومتر بود. شاخص NQI با استفاده از کل ویژگی‌ها، دقت بالاتری بر اساس آماره‌های R^2 برابر با ۰/۸۵ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE=۰/۰۱) برای تهیه نقشه کیفیت خاک داشت. قسمت وسیعی از منطقه کیفیت بالا داشت (کلاس II) و مناطقی محدود کیفیت متوسط (کلاس III) و بسیار بالا (کلاس I) داشتند. شاخص‌های کیفیت در منطقه وابستگی مکانی متوسطی داشتند (۰/۷۰-۰/۳۱). با توجه به پایین بودن ماده آلی و پایداری ساختمان خاک منطقه، با انتخاب روش مدیریتی مناسب مانند افزودن ماده آلی و سیستم خاک‌ورزی حفاظتی، می‌توان کیفیت خاک را بالا برد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه مؤلفه‌های اصلی، تغییرات مکانی، شاخص کیفیت خاک، وابستگی مکانی، کمترین تعداد داده‌ها

میرخانی ر.، واعظی ع. ر.، رضایی ح. ۱۴۰۰. توزیع مکانی کیفیت خاک در اراضی زراعی منطقه ساوجبلاغ استان البرز. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۹، شماره ۲. صفحه: ۱-۱۴.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران و عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲- استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (مکاتبه کننده)

۳- عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* پست الکترونیک: Vaezi.alireza@gmail.com

مقدمه

کیفیت خاک ابزاری مناسب برای مدیران کشاورزی، دانشمندان و سیاست‌گذاران جهت انتخاب روش‌های مدیریتی مناسب به منظور حفظ اراضی و کیفیت و کمیت محصول است. بهبود کیفیت خاک، حفظ عملکرد بالا و محیط زیست، از اهداف اصلی در ارزیابی کیفیت خاک می‌باشند (Moulood & Darwesh, 2020). آگاهی از وضعیت کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشاورزی و نحوه توزیع آن به دلیل ماهیت تغییرپذیری مکانی بالا حتی در فواصل کم در چگونگی مصرف نهاده‌ها و دست‌یابی به مدیریت جامع کشاورزی و بهره‌وری اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بسیاری از متغیرها و خصوصیات خاک، دارای تغییرات پیوسته مکانی می‌باشند. شناخت کمی این تغییرات برای اعمال مدیریت خاص مکانی که پایه و اساس کشاورزی دقیق است، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (Asghari *et a*l., 2015). تغییرات این ویژگی‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی (عوامل خاک‌سازی همانند مواد مادری) و عوامل بیرونی (همانند مدیریت خاک، کود دهی و تناوب زراعی) می‌باشند. ویژگی‌های خاک با نوع خاک، توپوگرافی، اقلیم، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی رابطه زیادی دارند که همه آن‌ها در الگوی توزیع مکانی خاک اثر گذارند (Sanaeinejad *et al*., 2010).

آگاهی از توزیع مکانی کیفیت خاک از مهم‌ترین موضوعات در شناسایی، برنامه‌ریزی، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب و خاک است. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه ارزیابی کیفیت خاک در ایران و جهان انجام گرفته است. با این وجود، مطالعات در زمینه تغییرات مکانی کیفیت خاک محدود است. برای ارزیابی تغییرات مکانی کیفیت خاک، باید شاخص کیفیت خاک که منعکس‌کننده تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مؤثر بر کیفیت خاک می‌باشند، تعیین گردد. ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک می‌توانند مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از آنها باشند. پژوهشگران زیادی، مجموعه‌های مختلفی از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک را برای تعیین شاخص کیفیت خاک پیشنهاد داده‌اند و شاخص کیفیت خاک را بر اساس مجموعه کل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک تعیین کرده‌اند. همچنین، پژوهشگران تعداد محدودتری از ویژگی‌هایی خاک را که نماینده بهتری از کیفیت خاک بودند، به عنوان مجموعه کمترین ویژگی-های موثر بر کیفیت خاک پیشنهاد کرده‌اند (Shahab, 1390). برای مثال، لی و همکاران (Li *et al*., 2013) به ارزیابی کیفیت خاک شالیزارهای شهرستان یجینگ در استان جیانگشی چین پرداختند. در این پژوهش ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک را تعیین و با روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) مواد آلی خاک، نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس و درصد شن را به عنوان حداقل مجموعه داده‌ها تعیین و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (SQI_W)محاسبه کردند. نتایج حاصله همبستگی معنی-داری ($p<۰/۰۱$) بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج نشان داد ($r=۰/۴۱$). رحمانی‌پور و همکاران (Rahmanipour *et al*., 2014) با پژوهشی در استان قزوین نشان دادند که برای تهیه نقشه کیفیت خاک، مدل شاخص کیفیت تجمعی ($r= ۰/۳۴$) بهتر از مدل شاخص کیفیت نمورو ($r=۰/۲۳$) و استفاده از کمترین داده‌ها مناسب‌تر از استفاده از کل ویژگی‌ها بود. سانچز- ناوارو و همکاران (Sánchez-Navarro *et al*., 2015) در استان مورسیا[1] در جنوب غرب اسپانیا با استفاده از روش کریجینگ، نقشه شاخص کیفیت نرمال‌شده (QI_N) را با استفاده از کمترین 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. رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al*., 2016) با بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای زعفران کاری منطقه قائن خراسان جنوبی، نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها ($r=۰/۴۴$) مناسب‌تر از شاخص کیفیت نمورو است. نبی اللهی و همکاران (Nabiollahi *et al*., 2017) تغییرات مکانی کیفیت خاک را در اراضی شور در استان کردستان بررسی کردند و نشان دادند که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی (SQI_w) (R^2 = ۰/۸۲) بهتر از روش استفاده از کیفیت خاک تجمعی ساده (SQI_a) (R^2 = ۰/۷۸) و شاخص کیفیت خاک نمورو (SQI_n) (R^2 = ۰/۷۴) است. با این روش به ترتیب ۲۸، ۵۹ و ۱۰ درصد منطقه دارای کیفیت خوب،

1. Murcia

متوسط و پایین بود و استفاده از کمترین داده‌ها را به دلیل صرفه‌جویی در هزینه و زمان، مناسب‌تر از کل داده‌ها می‌باشد. کلامبوکاتو و همکاران (Kalambukattu *et al.*, 2018) در منطقه هیماچال برادش هند توزیع مکانی کربن آلی و کیفیت خاک را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش عمق، کربن آلی خاک کاهش معنی‌داری داشت و حدود ۲، ۷۶ و ۲۲ درصد منطقه مورد مطالعه به ترتیب دارای شاخص کیفیت ۷۵<، ۷۵-۶۰ و ۶۰> بود. کلیمکویچ- پاولاس (Klimkowicz-Pawlas *et al.*, 2019) در پژوهشی در اراضی کشاورزی دو منطقه با جمعیت بالا (۱۱۵ km^2) در جنوب غرب و با جمعیت پایین (۱۰۸ km^2) در شرق لهستان که سابقه کشت یکسان ولی شدت در معرض آلودگی متفاوتی داشتند، کیفیت خاک تجمعی را بررسی کردند. در این تحقیق جمعیت انسانی به عنوان یک عامل مؤثر بر کیفیت خاک بود و شاخص کیفیت بالا مربوط به منطقه با جمعیت پایین تعیین شد و ۸۰ درصد نمونه‌های مناطق با جمعیت بالا دارای کیفیت پایین بودند. حمیدی و همکاران (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 ساده 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. جهانی و رضاپور (Jahani & Rezapour, 2020) در پژوهشی در منطقه نیمه‌خشک حوزه دریاچه ارومیه در جنوب شرق شهر ارومیه با بررسی تأثیر استفاده از پساب بر کیفیت خاک نشان دادند که استفاده از پساب به ترتیب موجب افزایش ۱۶-۶ درصد و ۱۱-۵ درصد کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگیها گردید. همچنین معالات رگرسیونی توانست به ترتیب ۷۶-۸۳ درصد و ۷۴-۶۷ درصد تغییرات عملکرد گندم را توسط کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها نشان دهد. مولود و دروش (Moulood & Darwesh, 2020) شاخص کیفیت تجمعی ساده و وزنی را در ۷۲ نمونه باغ گردو در استان اربیل عراق بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای انتخاب کمترین داده‌ها مناسب است.

در اکثر مطالعات تنها به بررسی تغییرات مکانی ویژگی-های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک پرداخته شده است و در خصوص تغییرات مکانی کیفیت خاک مطالعات اندکی به صورت منطقه‌ای انجام گرفته است. این پژوهش به منظور تعیین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و بررسی تغییرات مکانی کیفیت خاک، ارزیابی دقت و پهنه‌بندی مکانی کیفیت خاک منطقه ساوجبلاغ استان البرز انجام گرفت.

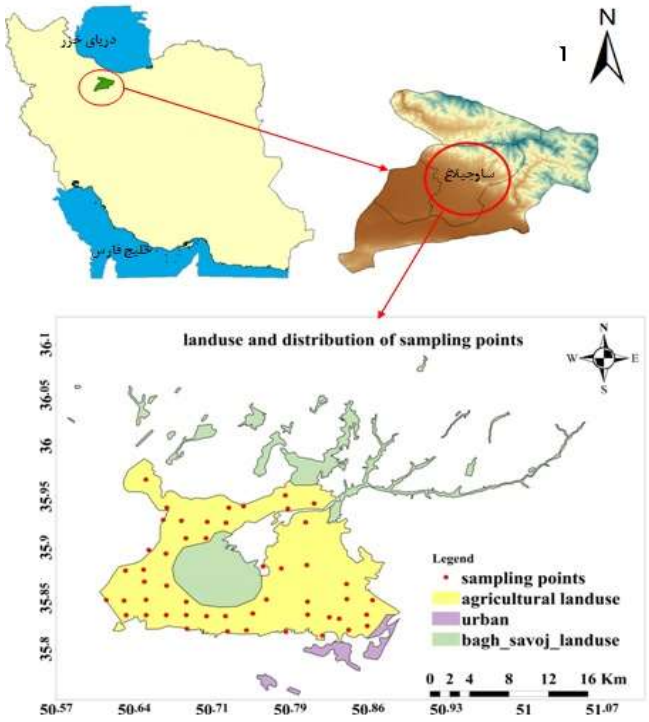
مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

شهرستان ساوجبلاغ با ۲۶۰۰۰ هکتار اراضی زراعی آبی در موقعیت جغرافیایی طول N ′۰۶ °۳۶ تا N ′۴۵ °۳۵ و عرض E ′۰۵ °۵۱ تا E ′۳۳ °۵۰ در مرکز استان البرز قرار دارد (شکل ۱). با توجه به شاخص اقلیمی دومارتن، منطقه اقلیم نیمه‌خشک با میانگین دمای سالیانه ۱۴ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالیانه ۳۷۳ میلی‌متر دارد. منطقه ساوجبلاغ دارای رژیم رطوبتی زریک و رژیم حرارتی مزیک و غالب خاک‌های منطقه مورد مطالعه Typic Calcixerepts, Typic Xerorthents می‌باشند.

نمونه‌برداری خاک و تجزیه آزمایشگاهی

برای نمونه‌برداری از خاک‌ها، منطقه مورد مطالعه به صورت ۵۰ شبکه مربعی به ابعاد ۱۶۵۰ متر × ۱۶۵۰ متر انجام تقسیم شد و نمونه‌های خاک سطحی (۳۰- ۰ سانتی‌متر) از کشتزار منتخب در مرکز هر شبکه برداشت شد (شکل ۱). ویژگی‌های فیزیکی شامل اندازه‌گیری مقادیر شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری، با ۱۳ قرائت ۳۰ ثانیه تا ۲۴ ساعت، چگالی ظاهری به روش سیلندر، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم 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 نمونه-های با بافت سنگین) (Soil Survey Staff, 2014; Aria & Mirkhani, 2005) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (Nimmo & Perkins, 2002) اندازه گیری شد.



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

Figure 1. Location of the study area and soil sampling points in Alborz province

و ویژگی‌های شیمیایی شامل شوری عصاره اشباع به وسیله EC سنج، واکنش گل اشباع به وسیله pH سنج، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkley & Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی-سازی با اسید کلریدریک (Page *et al.*, 1982)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن و همکاران (Olsen *et a.*,, 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 باEDTA در حضور معرف‌های اریوکروم بلاک تی و موروکساید، اندازه‌گیری و نسبت سدیم قابل جذب (SAR) از رابطه (۱) محاسبه شد (Page *et al.*, 1982).

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \qquad (۱)$$

تنفس میکروبی خاک (SMR) با اندازه‌گیری دی اکسید کربن آزاد شده از ۲۵ گرم خاک مرطوب در مدت هفت روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شد (Horwath & Paul, 1994).

تعیین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک

در این مطالعه به منظور انتخاب کمترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) در نرم افزار SPSS ۲۴ استفاده شد. جهت تعیین مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه مؤلفه‌های اصلی، از ضریب KMO[1] استفاده شد. اگر مقدار این ضریب در دامنه صفر تا ۰/۵ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نیستند و اگر ۱- ۰/۵ باشد، تجزیه مؤلفه‌های اصلی در کاهش داده-ها مناسب است. برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرها، از آزمون بارتلت استفاده شد (Jolliffe, 1986). پس از انجام تجزیه مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌هایی که ارزش ویژه آنها بیشتر از یک بودند، انتخاب شدند. سپس در هر کدام از مؤلفه‌های با ارزش ویژه بالاتر از یک، ویژگی با بالاترین ضریب بارگذاری انتخاب و ویژگی‌هایی با اختلاف حداکثر ده درصد از بالاترین ضریب بارگذاری به عنوان کمترین ویژگی‌های مؤثر انتخاب شدند. با توجه به این‌که ویژگی‌های انتخاب شده واحدهای متفاوتی دارند،

1 Kaiser-Meyer-Olkin

به‌منظور این‌که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، ویژگی‌ها به مقادیر بدون واحد تبدیل شدند. برای این منظور از توابع عضویت فازی استفاده شد. با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه به امتیازات بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تبدیل شدند (Qi *et al*., 2009). سه نوع منحنی نمره‌دهی "Less is better"، "More is better" و "Optimum range" برای تبدیل مقادیر به امتیاز بدون بعد بین صفر تا یک استفاده شد (Karlen and Scott, 1994). برای منحنی‌های نمره‌دهی "More is better" و "Less is better" به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) و منحنی "Optimum range" از تلفیق روابط (۲) و (۳) استفاده شد (MATLAB R2015b، ۲۰۱۵).

$$f(x,a,b)=\begin{cases}0 & x\le a\\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le\frac{a+b}{2}\\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2}\le x\le b\\ 1 & x\ge b\end{cases} \quad (۲)$$

$$f(x,a,b)=\begin{cases}1 & x\le a\\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le\frac{a+b}{2}\\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2}\le x\le b\\ 0 & x\ge b\end{cases} \quad (۳)$$

که در آنها: f(x) امتیاز ویژگی که بین صفر و یک است، x مقدار ویژگی، α مقدار آستانه پایین ویژگی و b مقدار آستانه بالای ویژگی هستند.

در ادامه سهم اشتراک‌پذیری[1] هر ویژگی به روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی به‌وسیله نرم‌افزار SPSS ۲۴ انجام و نسبت مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها، به‌عنوان وزن هر ویژگی برای تعیین شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی محاسبه شد.

تعیین شاخص‌های کیفیت خاک

بعد از اینکه وزن ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک تعیین شد، شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی ساده (SQI_A)، وزنی (SQI_W) و کیفیت نمورو (NQI) (Doran & Parkin, 1996) به ترتیب از روابط زیر به دست آمدند:

$$SQI_W=\sum_{i=1}^{n}S_iW_i \quad (۴)$$

$$SQI_A=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{n} \quad (۵)$$

$$NQI=\sqrt{\frac{P_{ava}{}^2+P_{\min}{}^2}{2}}\times\frac{n-1}{n} \quad (۶)$$

که در آن‌ها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر، P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار موجود در بین ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر نمونه است. در جدول ۱ انواع شاخص‌های کیفیت خاک به کار رفته در این مطالعه و کلاس‌بندی آنها آمده است.

بررسی تغییرات مکانی و پهنه بندی کیفیت خاک

ابتدا نیم‌تغییرنمای شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از نرم‌افزار GS^+ تهیه شد و شاخص‌های نیم‌تغییرنما شامل دامنه تأثیر، آستانه، اثر قطعه‌ای و کلاس وابستگی مکانی تعیین شدند. با استفاده از نرم افزار GS^+ (Version 5.1) نیم تغییرنما مربوط به همه متغیرهای مورد مطالعه محاسبه شد. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که میانگین مربع اختلافات بین جفت مقادیر z(x) و z(x + h) است که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند (Mohammadi، 2006):

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left\{Z(x_i)-Z(x_i+h)\right\}^2 \quad (۷)$$

که در آن γ(h) مقدار نیم‌تغییرنما در فاصله h، N(h) تعداد جفت نمونه، به ازای فاصله *h*، $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ به ترتیب مقادیر متغیّر در موقعیت x_i و $x_i + h$ است.

1. Communality

جدول ۱- طبقه بندی شاخص‌های کیفیت خاک (Nabiollahi *et al*., 2017)

Table 1. Classification of soil quality indices

Index	Indicator method	Soil quality grade				
		Very high (I)	High (II)	Moderate (III)	Low (IV)	Very Low (V)
Nemoro Quality Index (NQI)	Minimum Data Set (MDS)	>0.44	0.38-0.44	0.31-0.38	0.24-0.31	<0.24
	Total Data Set (TDS)	>0.48	0.41-0.48	0.34-0.41	0.27-0.34	<0.27
Additive Soil Quality Index (SQI_a)	Minimum Data Set (MDS)	>0.70	0.60-0.70	0.50-0.60	0.40-0.50	<0.40
	Total Data Set (TDS)	>0.71	0.61-0.71	0.51-0.61	0.41-0.51	<0.41
Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w)	Minimum Data Set (MDS)	>0.69	0.59-0.69	0.49-0.59	0.39-0.49	<0.39
	Total Data Set (TDS)	>0.72	0.62-0.72	0.52-0.62	0.42-0.52	<0.42

برای ارزیابی بهترین برازش مدلهای تئوری (خطی، نمایی، کروی و یا گوسی) بر نیم تغییرنمای تجربی، از آماره‌های مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. آماره RSS نشان‌دهنده انحراف مقادیر پشی-بینی شده از مقادیر واقعی می‌باشد و هر چه RSS کوچکتر باشد، مدل از دقت بالاتری برخوردار است. بعد از برازش مدلها به نیم‌تغییرنما، برای پی بردن به قدرت ساختار (وابستگی مکانی) متغیر از نسبت واریانس قطعه‌ای (C0) به آستانه نیم‌تغییرنما (C0+C) استفاده شد. با کمک این نسبت می‌توان میزان نسبی اثر واریانس قطعه‌ای را در بین صفات مختلف مقایسه کرد (Trangmar, 1986). مقادیر وابستگی مکانی کم‌تر از ۲۵ درصد، ۷۵-۲۵ و بیشتر از ۲۵ به ترتیب نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی، متوسط و ضعیف متغیر در منطقه می‌باشد. از روش کریجینگ معمولی برای میان‌یابی مکانی شاخص‌های کیفیت خاک و تهیه نقشه استفاده شد. در روش کریجینگ برای تخمین مقدار متغیر در نقطه مجهول از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z_{vi} \qquad (۸)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \qquad (۹)$$

که در آن Z_v^* مقدار تخمینی، λ_i وزن یا اهمیت کمیّت وابسته به نمونهٔ iام و Z_{vi} مقدار مشاهده‌ای نمونهٔ iام است.

برای آگاهی از صحت مدل واریوگرامی مورد استفاده در تخمین کریجینگ، مقادیر تخمینی با مقادیر واقعی مقایسه شدند تا خطای تخمین کریجینگ محاسبه شود .هرچه مقدار این خطا به عدد صفر نزدیکتر باشد، صحت تخمین کریجینگ بالاتر خواهد بود. برای این منظور، از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطای تخمین نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها عبارت‌اند از:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]^2} \qquad (۱۰)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]^2} / \overline{Z} \qquad (۱۱)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - Z(x_i)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[Z^*(x_i) - \overline{Z}(x_i)\right]^2} \qquad (۱۲)$$

که در آن؛ $Z^*(x_i)$ مقدار تخمینی متغیر موردنظر در نقطه‌ی x_i ، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه x_i، $\overline{Z}$ مقدار میانگین متغیر و n تعداد نقاط است.

تحلیل آماری داده‌ها

با استفاده از نرم افزار SPSS (version, 24) آماره‌های میانگین، فراوانی (مد)، میانه، واریانس، ضریب تغییرات، چولگی، انحراف معیار، کشیدگی مورد بررسی قرار گرفت. آزمون نرمال بودن داده‌ها توسط آزمون کولموگروف - اسمیرونوف انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با توجه به میانگین رس (۲۴ درصد)، سیلت (۳۵ درصد) و شن (۴۱ درصد) در نمونه‌ها، خاک‌های منطقه غالباً دارای بافت لوم و لوم رسی هستند. pH خاک‌های منطقه دارای محدوده ۸/۱۷- ۷/۴۴ و میانگین آن حدود ۷/۸۶ است. نظر به اینکه pH مطلوب برای رشد گندم (کشت غالب منطقه) ۷ است (Sys *et al.*, 1993)، لذا pH خاک کشتزارهای منطقه برای رشد گندم که کشت غالب منطقه می‌باشند، بالاتر از حد مطلوب است. با توجه به مقادیر حداقل (۵/۰۰ درصد)، بیشینه (۲۳/۲ درصد) و میانگین کربنات کلسیم معادل (۱۴/۴۸ درصد)، منطقه مورد مطالعه دارای خاک آهکی می‌باشد. از طرفی، خاک‌های منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار آهن، روی، منگنز، بر، مس، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، شوری و سدیمی بودن (جدول ۲) محدودیتی برای رشد گندم ندارند (Moshiri *et al*, 2014). به‌دلیل کربن آلی پایین (میانگین ۱ درصد)، منطقه مورد مطالعه از نظر میانگین وزنی قطر خاکدانه (۰/۶۵ سانتی‌متر) و درصد آب قابل دسترس گیاه (۱۳/۷۶) ضعیف و دارای محدودیت است.

مؤلفه‌های اصلی کیفیت خاک

با توجه به نتایج آزمون بارتلت و KMO، مقادیر KMO برابر ۰/۶۴ است و آزمون بارتلت نیز در سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار است. لذا داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای انتخاب کمترین ویژگی‌ها مناسب می‌باشند.

جدول ۳ مقادیر ارزش ویژه (EV)، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده در چهار مؤلفه با ارزش ویژه بیشتر از یک را نشان می‌دهد. استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک، ۶۸ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان می‌کند. یوهاوس و همکاران (Juhos *et al*., 2015) نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک ۷۶ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان می‌کند. در مؤلفه‌های انتخاب شده ویژگی‌هایی با ضریب بارگذاری بالا تا ۱۰ درصد کمتر از بالاترین ضریب بارگذاری هر مؤلفه انتخاب شد. به این ترتیب، در مؤلفه اول با ارزش ویژه ۳/۷۸، پتاسیم قابل جذب، کربن آلی و فسفر قابل جذب به ترتیب با بالاترین ضریب بارگذاری ۰/۸۶، ۰/۸۱ و ۰/۷۸، مؤلفه دوم با ارزش ویژه ۲/۶۴، آب قابل استفاده گیاه و رس به ترتیب با ضریب بارگذاری ۰/۸۴ و ۰/۷۶، مؤلفه سوم با ارزش ویژه ۱/۸۰، منگنز و مس به ترتیب با ضریب بارگذاری ۰/۵۶ و ۰/۵۴، مؤلفه چهارم با ارزش ویژه ۱/۳۰، pH و منگنز به ترتیب با ضریب بارگذاری ۰/۶۲- و ۰/۵۸ انتخاب شدند.

سپس در هر مؤلفه، همبستگی بین ویژگی‌های انتخاب شده بررسی و از بین ویژگی‌هایی که همبستگی بالایی (r=۰/۶) داشتند، ویژگی با ضریب بارگذاری بالا انتخاب شد. به این ترتیب، پتاسیم قابل جذب، آب قابل استفاده گیاه، منگنز، مس و pH به عنوان کمترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. سیلسپور و رشیدی (Seilsepour & Rashidi, 2016) در استان تهران ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بررسی و مقادیر حاصله را امتیازدهی کردند. آن‌ها دریافتند که pH، فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده به ترتیب با امتیاز ۸۸، ۱۰۰ و ۱۰۰ دارای امتیاز بالا و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، رطوبت قابل‌استفاده گیاه و درصد ماده آلی به ترتیب با امتیاز ۲۰، ۴۴ و ۳ دارای امتیاز پایین بودند که نشان‌دهنده پایین بودن کیفیت فیزیکی و بیولوژیکی خاک منطقه بود.

شاخص‌های کیفیت خاک

جدول ۴ کمترین، بیشترین، میانگین و میانه کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (SQI_a) و وزنی (SQI_w) با استفاده از کل ویژگی‌ها (TDS) و کمترین ویژگی‌ها (MDS) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، منطقه ساوجبلاغ دارای طیف وسیعی از مقادیر کیفیت خاک است با توجه به مقادیر میانگین و میانه شاخص کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (SQI_a) و وزنی (SQI_w)، بیش از ۵۰ درصد نقاط مورد مطالعه در کلاس خوب و خیلی خوب قرار دارد.

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

Table 2. Descriptive statistics of soil physical and chemical properties in measured samples (n=95)

Soil properties	Minimum	Maximum	Average	Std. deviation	Skewness	Kurtosis
Sand(%)	15.00	71.50	40.71	10.88	0.38	0.83
Silt(%)	18.00	46.00	34.91	6.00	-0.65	1.08
Clay(%)	1.50	40.00	24.38	6.38	0.28	-0.40
BD ($g.cm^{-3}$)	1.07	1.74	1.44	0.14	-0.12	-0.04
MWD (cm)	0.00	2.03	0.65	0.38	1.06	2.23
AW(%)	8.24	18.69	13.76	2.12	-0.26	0.56
Ks($m.day^{-1}$)	0.01	2.15	0.46	0.50	1.57	2.19
pH	7.44	8.17	7.86	0.17	-0.18	-0.76
Ec ($dS.m^{-1}$)	0.54	14.21	2.37	2.44	2.86	10.65
OC(%)	0.53	2.35	1.02	0.34	1.69	4.30
CCE (%)	5.00	23.2	14.48	4.41	0.78	-0.04
SAR	0.33	6.48	1.63	1.26	1.98	4.33
P_{ava} ($mg.kg^{-1}$)	3.20	173.00	41.55	44.44	1.55	1.77
K_{ava} ($mg.kg^{-1}$)	100.00	1250.0	433.66	244.12	1.66	3.33
Fe ($mg.kg^{-1}$)	2.02	16.02	6.29	2.85	1.26	2.14
Cu ($mg.kg^{-1}$)	1.06	4.06	2.15	0.79	0.83	-0.15
Mn ($mg.kg^{-1}$)	2.26	21.06	10.97	4.18	0.46	0.57
B ($mg.kg^{-1}$)	0.48	7.56	2.31	1.07	2.51	11.19
Zn ($mg.kg^{-1}$)	0.46	8.08	2.16	1.70	1.61	2.62
SMR (mg CO_2. $day^{-1}.g^{-1}$)	0.59	1.46	0.91	1.97	0.88	0.76

برخی از علائم استفاده شده عبارتند از: CCE: کربنات کلسیم معادل، SAR: نسبت جذب سدیم، OC: کربن آلی، BD: جرم مخصوص ظاهری،AW: آب قابل استفاده گیاه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و SMR: تنفس میکروبی خاک است.

جدول ۳ - مقادیر ارزش ویژه، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده در مؤلفه‌ها

Table 3. Eigenvalue, cumulative percent and loading coefficient values of the selected properties in the components

	component			
	1	2	3	4
Eigenvalue	3.78	2.64	1.80	1.30
Cumulative percent	21.11	40.27	57.94	67.99
K_{ava}	0.86			
O.C	0.81			
P_{ava}	0.78			
AW		0.84		
Clay		0.76		
Mn			0.56	0.58
Cu			0.54	
pH				-0.62

جدول ۴- آماره‌های توصیفی کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه

Table 4. Descriptive statistics of soil quality in agricultural lands of the study area

Soil Quality Index	Indicator method	Minimum	Maximum	Mean	Median
Nemoro Quality Index (NQI)	Minimum Data Set	0.21	0.44	0.35	0.36
	Total Data Set	0.33	0.52	0.44	0.44
Additive Soil Quality Index (SQI_a)	Minimum Data Set	0.38	0.73	0.62	0.63
	Total Data Set	0.49	0.77	0.66	0.65
Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w)	Minimum Data Set	0.42	0.76	0.64	0.64
	Total Data Set	0.49	0.79	0.66	0.66

تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵، شاخص SQI_a دارای وابستگی مکانی قوی (۰/۱۳) و بقیه شاخص‌ها دارای وابستگی مکانی متوسط (۰/۷۰-۰/۳۱) هستند. لذا، کیفیت خاک منطقه تحت تأثیر توام عوامل ذاتی (مانند نوع خاک، مواد مادری و شرایط زهکشی منطقه) و بیرونی و پویای خاک (مانند مدیریت زراعی، مدیریت حاصلخیزی و مدیریت آبیاری) است (Sun *et al*., 2003). نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش یافته برای شاخص NQI با استفاده از کمترین ویژگی‌ها، مدل گوسی است و برای بقیه شاخص‌ها با استفاده از کمترین ویژگی‌ها و کل ویژگی‌ها، مدل نمایی است. شاخص NQI با استفاده از کمترین ویژگی‌ها و کل ویژگی‌ها به ترتیب با RMSE برابر ۱۱/۳۵ و ۱۲/۲۵ و R^2 برابر ۰/۸۲ و ۰/۸۵ می‌باشد دارای کمترین RMSE و بالاترین R^2 می‌باشد. همچنین بر اساس مدل‌های ذکر شده، دامنه وابستگی مکانی در شاخص‌های کیفیت خاک متفاوت بوده و محدوده وابستگی مکانی برای شاخص‌های SQI_a، SQI_W و NQI به ترتیب ۶/۲-۶، ۳/۶۵-۲/۷، ۷/۲-۴/۵ کیلومتر است. مقادیر کشیدگی و چولگی و نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف شاخص‌های کیفیت خاک نشان می‌دهد که مقادیر داده-های به دست آمده نرمال هستند (جدول ۶).

با توجه به نتایج ارزیابی معیارهای خطا (جدول ۷)، در شاخص‌های SQI_W، SQI_a و NQI، با استفاده از کمترین ویژگی‌ها، مقادیر R^2 به ترتیب برابر ۰/۶۹، ۰/۷۱، ۰/۸۲و مقادیر NRMSE به ترتیب برابر ۱۴/۵۶، ۲۰/۲۹ و ۱۱/۳۵ می‌باشد. با استفاده از کل ویژگی‌ها، مقادیر R^2 به ترتیب برابر ۰/۷۳، ۰/۷۸ و ۰/۸۵ و مقادیر NRMSE به ترتیب برابر ۱۲/۲۵، ۲۱/۱۲ و ۱۲/۲۵ می‌باشند.

جدول ۵- مؤلفه‌های نیم تغییرنماهای برازش یافته

Table 5. Components of fitted semivariograms

Index	Method	Model	Nugget (C_0)	sill (C_0+C)	Range (A_0)	R^2	RSS	degree of spatial dependence (C_0/C_0+C)*100	Skewness	Kortosis
SQI_W	MDS	Exponential	0.070	0.210	3650	0.79	1.19×10^3	0.498	-0.682	0.205
	TDS	Exponential	0.030	0.099	2700	0.99	2.37×10^4	0.307	-0.062	-0.322
SQI_a	MDS	Exponential	0.075	0.600	6000	0.92	3.4×10^2	0.125	-1.135	0.893
	TDS	Exponential	0.100	0.234	6200	0.89	4.2×10^4	0.427	-0.018	-0.333
NQI	MDS	Gaussian	0.630	0.900	7200	0.93	9.9×10^3	0.700	-1.020	0.882
	TDS	Exponential	0.138	0.210	4500	0.89	2.55×10^4	0.657	-0.022	-0.314

جدول ۶- آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف در شاخص‌های کیفیت خاک

Table 6. Kolmogorov-Smirnov test in soil quality indices

	Soil Quality Index					
	Minimum Data Set (MDS)			Total Data Set (TDS)		
	SQI_W	SQI_a	NQI	SQI_W	SQI_a	NQI
Kolmogorov-Smirnov test	0.965	1.488	1.436	0.519	0.672	0.699
p-Value	0.309	0.024	0.032	0.950	0.757	0.714

با توجه به نتایج، استفاده از کل ویژگی‌ها به دلیل R^2 بالاتر و NRMSE نزدیک به هم از دقت نسبتاً زیادی در مقایسه با استفاده از کمترین ویژگی‌های خاک برخوردار است. لیما و همکاران (Lima *et al*., 2013) نیز در پژوهشی نشان دادند که برای ارزیابی کیفیت خاک، استفاده از کل ویژگی‌های انتخاب شده، بهترین ارزیابی را داشت. رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al*., 2016) نیز با بررسی کیفیت خاک در منطقه قائن خراسان جنوبی، نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (SQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها (r=۰/۴۴) مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در کشتزارهای زعفران است. همچنین با توجه به نتایج آماره‌های R^2 (۰/۸۵) و NRMSE (۱۲/۲۵)، برای تهیه نقشه کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه شاخص NQI با استفاده از کل ویژگی‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. رحمانی‌پور و همکاران (Rahmanipour *et al*., 2014) در پژوهشی با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی و نمورو نقشه کیفیت منطقه قزوین را بررسی کردند و نشان دادند که مدل شاخص کیفیت تجمعی (r= ۰/۳۴)

بهتر از مدل شاخص کیفیت نمورو (r=۰/۲۳) بود و استفاده از کمترین داده‌ها را به دلیل کاهش هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک پیشنهاد کردند. نبی اللهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) نیز در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری استان کردستان در ایران نشان دادند که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از SQI_w (R^2 = ۰/۸۲) بهتر از SQI_a (R^2 = ۰/۷۸) و NQI (۰/۷۴ = R^2) بود و استفاده از مجموع کل داده‌ها نیز بهتر از مجموعه کمترین داده‌ها بود. با این حال، استفاده از شاخص SQI_w و روش مجموعه کمترین داده‌ها به‌دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک پیشنهاد کردند.

شکل ۲ نقشه شاخص‌های کیفیت خاک مربوط به کلاس‌های مختلف کیفیت خاک را نشان می‌دهند. با توجه به نقشه کیفیت خاک منطقه (شکل ۲)، در شاخص نمورو با استفاده از کل ویژگی‌ها قسمت وسیعی از منطقه دارای کیفیت بالاست و در قسمت غرب و شمال غرب و شمال شرقی منطقه به صورت لکه‌ای دارای کیفیت متوسط و قسمت‌هایی از مرکز منطقه مورد مطالعه نیز به صورت لکه‌ای دارای کیفیت بسیار بالاست.

شکل ۲ نقشه شاخص‌های کیفیت خاک مربوط به کلاس‌های مختلف کیفیت خاک را نشان می‌دهند. با توجه به نقشه کیفیت خاک منطقه (شکل ۲)، در شاخص نمورو با استفاده از کل ویژگی‌ها قسمت وسیعی از منطقه دارای کیفیت بالاست و در قسمت غرب و شمال غرب و شمال شرقی منطقه به صورت لکه‌ای دارای کیفیت متوسط و قسمت‌هایی از مرکز منطقه مورد مطالعه نیز به صورت لکه‌ای دارای کیفیت بسیار بالاست.

جدول ۷- مقادیر ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) در شاخص‌های کیفیت خاک

Table 7. R^2 and normalized root mean squares error (NRMSE) values in soil quality indices

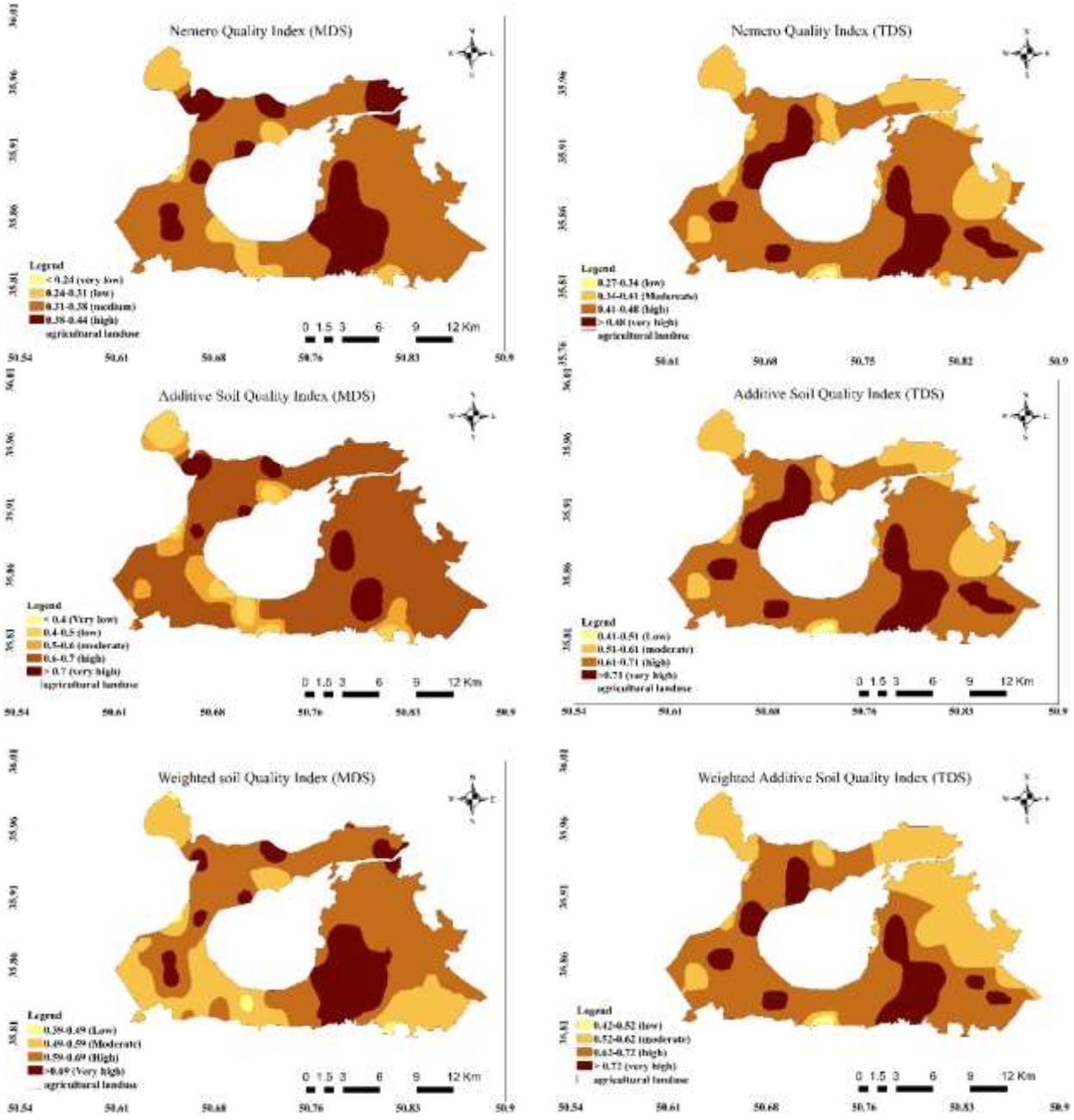
Index	Method	R^2	NRMSE
Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w)	Minimum Data Set	0.69	14.56
	Total Data Set	0.73	12.25
Additive Soil Quality Index (SQI_a)	Minimum Data Set	0.71	20.29
	Total Data Set	0.78	21.12
Nemoro Quality Index (NQI)	Minimum Data Set	0.82	11.35
	Total Data Set	0.85	12.25

علت وجود لکه‌هایی با کیفیت بالا و متوسط در منطقه به دلیل اعمال مدیریت‌های مختلف مانند روش‌های روش-های خاکورزی با تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، کوددهی با تأثیر بر ویژگی‌های شیمیایی، نوع کشت به دلیل مدیریت متفاوت تهیه بستر کشت و کوددهی متفاوت و غیره می-تواند باشد. با توجه به شکل ۲، در روش استفاده از کل ویژگی‌ها کلاس کیفیت اراضی افزایش داشت در صورتی که نبی اللهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) در اراضی شور استان کردستان ایران نشان دادند که در روش استفاده از کمترین داده‌ها نسبت به کل داده‌ها مساحت کلاس خیلی خوب و خوب کاهش و مساحت و نمرات زمین‌های با کیفیت پایین و خیلی پایین افزایش داشت. رنجبر و همکاران (Ranjbar *et al.*, 2016) با بررسی کیفیت خاک در برخی از مناطق زعفران کاری ایران (منطقه قائن در خراسان جنوبی)، نشان دادند که در روش NQI سطح کشتزارهای با کیفیت خیلی خوب بالاترین و در روش SQI_w ، پایین‌ترین است ولی در کلاس خوب بالاترین و پایین‌ترین سطح به ترتیب مربوط به SQI_w و NQI است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که برای تهیه نقشه کیفیت خاک در کشتزارهای منطقه، شاخص کیفیت نمورو (NQI) با استفاده از کل ویژگی‌ها مناسب‌تر است. بهترین مدل زمین‌آماری برازش یافته بر داده‌های مکانی شاخص NQI حاصل از کل داده‌ها، مدل نمایی (R^2=۰/۹۵) با دامنه تأثیر ۴/۵ کیلومتر و RSS برابر $۲/۵۵ \times ۱۰^{-۴}$ است. کیفیت خاک در منطقه تحت تأثیر pH، آب قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده، منگنز و مس است. در شاخص نمورو با استفاده از کل ویژگی‌ها قسمت وسیعی از منطقه دارای کیفیت بالاست و در قسمت غرب و شمال غرب و شمال شرقی منطقه به صورت لکه‌ای دارای کیفیت متوسط و قسمت‌هایی از مرکز منطقه مورد مطالعه نیز به صورت لکه‌ای دارای کیفیت بسیار

بالاســت. ارزیابی درجه تغییرپذیری مکانی شــاخص‌های کیفیت تجمعی و نمورو نشان داد که شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه دارای وابستگی مکانی متوسط است. لذا کیفیت خاک منطقه تحت تأثیر توام عوامل ذاتی و بیرونی و پویای خاک (مانند مدیریت زراعی، مدیریت حاصــخیزی و مدیریت آبیاری) اســت و علت وجود لکه‌هایی با کیفیت بالا و متوســط در منطقه می‌تواند به دلیل اعمال مدیریت های مختلف مانند روش های خاکورزی با تأثیر بر ویژگی های فیزیکی، کوددهی با تأثیر بر ویژگی های شــیمیایی، نوع کشــت به دلیل مدیریت متفاوت تهیه بستر کشت و کوددهی متفاوت و غیره باشــد. از این رو با توجه به پایین بودن ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه، با انتخاب روش مدیریتی مناســب مانند افزودن ماده آلی و کوددهی مناســب می‌توان کیفیت خاک کشــتزارهای منطقه مورد مطالعه را بالا برد.



شکل ۲- نقشه‌های کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌ها و کمترین ویژگی‌ها

Figure 2. Soil quality maps indices using minimum data set (MDS) and total data set (TDS)

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 fandoghlou region of Ardabil using geostatistics. *Journal of Water and Soil (Agricultural sciences and Technology)*, 28(6): 1271 - 1283.

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*.

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.

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.

Jahani M., and Rezapour S. 2020. Assessment of the quality indices of soils irrigated with treated wastewater in a calcareous semi-arid environment. *Ecological Indicators, 109*: 105800.

Jolliffe I.T. 1986. Principal components in regression analysis. In *Principal component analysis* (pp. 129-155). Springer, New York, NY.

Juhos K., Szabó S. and Ladányi M. 2015. Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach. *International Agrophysics*, 29: 433-440.

Kalambukattu J.G., Kumar S., and Ghotekar Y.S. 2018. Spatial variability analysis of soil quality parameters in a watershed of Sub-Himalayan Landscape-A case study. *Eurasian Journal of Soil Science*, *7*(3): 238-250.

Karlen D.L., Scott D.E., 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*, Madison, WI, USA, pp. 53–72.

Klimkowicz-Pawlas A., Ukalska-Jaruga A., and Smreczak B. 2019. Soil quality index for agricultural areas under different levels of anthropopressure. *International Agrophysics*, *33*(4): 455-462.

Li P., Zhang T., Wang X. and Yu D. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and tillage research*, *126*, pp.112-118.

Lima A.C.R., Brussaard L., Totola M.R., Hoogmoed W.B., and De Goede R.G.M. 2013. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology*, *64*: 194-200.

MATLAB R2015b. 2015. Software for technical computing and model-based design. The Mach Works ins, USA.

Mohammadi J. 2006. Pedometer (Spatial Statistics), *Published Pelk*, Tehran, Iran.

Moshiri F., Shahabi A.A., Keshavarz P., Khogar Z., Feyzi Asl V., Tehrani M.M., Asadi Rahmani H., Samavat S., Gheibi M.N., Sedri M.H., Rashidi N., Saadat S., and Khademi Z. 2014. Guideline for integrated soil fertility and plant nutrition management of wheat. Soil and Water Research Institute, Iran. p:84. (In Persian)

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.

Nimmo, J.R., Perkins, K.S., 2002. Aggregate stability and size distribution methods of soil analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science of America, Madison, pp. 317–328.

Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and 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.

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.

Rashidi M., Seilsepour M. 2016. Soil Quality Assessment in Varamin Region, Iran. *Agricultural Engineering Research Journal*, *6*(3): 31-37.

Sanaeinejad S.H., Astaraei A.R. Ghaemi M., and 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.

Shahab H., Emami H., Haghnia Gh., and Karimi A. 2011. Determining most Important Properties for Soil Quality Indices of Agriculture and Range Lands in some Parts of Southern Mashhad. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1197-1205. (In Persian with English abstract)

Soil Survey Staff, 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5. In: Burt, R., Soil Survey Staff (Eds.), United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

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.

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.

Yao R.J., Yang J.S., Zhao X.F., Li X.M., and Liu M.X. 2013. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil and Tillage Research*, 128: 137–148.

Spatial Distribution of Soil Quality in Savojbolagh Fields in Alborz Province

Rasoul Mirkhani[1], Ali Reza Vaezi[2*], Hamed Rezaei[3]

(Received: July, 2020 Accept: November, 2020)

Abstract

Knowledge on the spatial distribution of soil quality is one of the most important issues in recognition, planning, management and optimal exploitation of soil resources. In this study, physical, chemical and biological properties of topsoil (0-30 cm) were measured in 50 fields (1650 m × 1650 m) in Savojbolagh region, Alborz province. All of the factors influencing soil quality were selected using the principal component analysis (PCA). The Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w), the Additive Soil Quality Index (SQI_a) and the Nemero Soil Quality Index (NQI) were quantified using either the total data set (TDS) or the minimum data set (MDS). Spatial variability of these soil quality indices were analyzed using geostatistical technique. In addition, spatial distribution of them were determined using the Ordinary Kriging method. The results showed that for the NQI index, the best fitted model was the Gaussian (R^2= 0.93) when MDS was used, whereas, the exponential (R^2= 0.79-0.99) model was strongly fitted to the other indices obtained from MDS and TDS. Furthermore, the effective range of spatial variability for SQI_a, SQI_w and NQI indices was 6-6.2, 2.7-3.65 and 4.5-7.2 kilometers, respectively. The NQI obtained from the TDS appeared to have the higher accuracy in the area (R^2= 0.85, normalized root mean squares error (NRMSE) = 0.01). A large part of the area has high quality (class II) as well as to some extent areas have medium quality (class III) and very high (class I). Soil quality indices in the region were in moderate spatial dependence (0.31-0.7). So, the soil quality in the region is affected by both natural and external factors. Therefore, regarding the low organic matter as well as the weak structural stability of soil in the study area, one may expect that by implementing appropriate management methods such as adding organic matter, the soil quality will be increased.

Keywords: Principal component analysis, Spatial variability, Soil quality Index, Spatial dependence**,** Minimum data set

Mirkhani R., Vaezi A. R. and Rezaei H. 2021. Spatial distribution of soil quality in Savojbolagh fields in Alborz province. *Applied Soil Research*, 9(2): 1-14.

1. Ph.D. student of Department of Soil Science Zanjan University, Zanjan, Iran and Members of Scientific Board of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran
2. Full Professor of Department of Soil Science, Zanjan University, Zanjan, Iran
3. Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran
* Corresponding Author Email: Vaezi.alireza@gmail.com