



نقشه‌برداری رقومی شاخص کیفیت خاک (مطالعه موردی: قروه، استان کردستان)

لیلا رسولی^۱، *کمال نبی‌اللهی^۲ و روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان، ^۲دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان،

^۳استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه اردکان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: کیفیت خاک یکی از خصوصیات بسیار مهم خاک بوده که بررسی تغییرات مکانی آن، جهت مدیریت و تخریب خاک مهم می‌باشد. رویکرد کمی کردن کیفیت خاک با استفاده از شاخص‌های کیفیت، جهت فهم بهتر اکوسیستم‌های خاک به‌طور گسترده‌ای به‌کار برده شده است. شاخص کیفیت خاک از طریق اندازه‌گیری یکسری خصوصیات خاک محاسبه می‌شود که اندازه‌گیری این خصوصیات گران و زمان‌بر می‌باشد که یکی از راه‌ها جهت این کاهش هزینه و زمان، استفاده از تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک است که می‌تواند خصوصیات خاک را با استفاده از داده‌های کمکی و مدل‌های داده‌کاوی به‌صورت رقومی پیش‌بینی کند. هدف از این پژوهش استفاده از مدل جنگل تصادفی و داده‌های کمکی برای نقشه‌برداری شاخص کیفیت خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها: بر اساس نقشه ژئومورفولوژی، ۱۷ پروفیل خاک و ۱۰۵ نمونه اوگر از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری در منطقه قروه استان کردستان (با وسعت ۶۵۰۰ هکتار) برداشت شد و بافت خاک، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی، اسیدیته، کربنات کلسیم معادل، ازت کل، فسفر در دسترس، شدت تنفس میکروبی، نسبت جذب سطحی سدیم (SAR)، جرم مخصوص ظاهری و درصد سنگریزه اندازه‌گیری و محاسبه شدند و سپس شاخص کیفیت وزنی تجمعی خاک محاسبه شد. متغیرهای محیطی در این پژوهش نقشه ژئومورفولوژی، پارامترهای سرزمین و داده‌های تصویر ETM⁺ بودند. نقشه ژئومورفولوژی بر اساس روش سلسه‌مراتبی تهیه شد. پارامترهای سرزمین (شامل ۱۰ پارامتر)، شاخص تعدیل شده خاک (SAVI)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص گیاهی نرمال شده (NDVI) به‌ترتیب با استفاده از نرم‌افزار SAGA و ArcGIS10.3 محاسبه و استخراج گردید. جهت ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و متغیرهای کمکی از مدل جنگل تصادفی استفاده شد و با استفاده از روش اعتبارسنجی دوجانبه و پارامترهای آماری شامل ضریب تبیین، میانگین خطا و میانگین ریشه مربعات خطا مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: بر اساس آنالیز واریانس مشترک (سهم هر ویژگی) جرم مخصوص ظاهری خاک، شن، ظرفیت تبادل کاتیونی و رس دارای بیش‌ترین وزن ($\geq 0/1$) و سنگریزه و SAR دارای کم‌ترین وزن ($\leq 0/05$) در میان ویژگی‌های کیفیت

* مسئول مکاتبه: k.nabiollahi@uok.ac.ir

خاک بودند. برای پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک، متغیرهای کمکی شامل شیب، شاخص SAVI، شاخص خیسی، شاخص MrVBF، فاکتور LS، ارتفاع، شاخص NDVI و نقشه ژئومورفولوژی مهم‌ترین بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل جنگل تصادفی با ۰/۶۵، ۰/۴۲ و ۰/۶۲ به ترتیب برای ضریب تبیین، میانگین خطا و میانگین ریشه مربعات خطا دارای دقت نسبتاً مناسب برای پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک بودند. شاخص کیفیت خاک در محدوده بین ۰/۳-۰/۶۵ قرار داشت و میانگین مقادیر آن در واحدهای ژئومورفولوژی (مناطق مرتفع شمال، شمال‌غربی و شمال‌شرقی) با شیب زیاد و عمق کم خاک (Mo131، Mo141 و Hi231) کم‌ترین و در واحدهای با شیب کم و عمق زیاد خاک (Pi111، Pi311، Pi322، Pi211 و Pi312) بیش‌ترین بود که از لحاظ آماری هم این اختلافات معنی‌داری می‌باشند.

نتیجه‌گیری: در پژوهش حاضر از مدل جنگل تصادفی جهت بررسی تغییرات مکانی شاخص کیفیت خاک در منطقه قروه استان کردستان استفاده شد. شرایط ژئومورفولوژیک منطقه مطالعاتی بسیاری از خصوصیات خاک و متعاقباً شاخص کیفیت خاک را در منطقه تأثیر قرار داده است. مدل جنگل تصادفی برآورد نسبتاً دقیقی از شاخص کیفیت خاک داشت. بنابراین پیشنهاد می‌گردد جهت نقشه‌برداری خصوصیات خاک از تکنیک‌های پدومتری (هم‌چون جنگل تصادفی) و داده‌های کمکی مانند نقشه ژئومورفولوژی، اجزاء سرزمین و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: جنگل تصادفی، خصوصیات سرزمین، کیفیت خاک، لندست، نقشه ژئومورفولوژی

مقدمه

کیفیت خاک عبارت از توانایی خاک جهت حفظ توان تولید بیولوژیک، بهبود کیفیت آب و هوا و همچنین تأمین سلامت انسان، گیاه و حیوان است (۲۳). کیفیت خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مورد بررسی در ارزیابی مدیریت خاک و پایداری قلمرو زیستی به حساب می‌آید (۱۵) و آگاهی از تغییرات کیفیت به منظور مدیریت پایدار خاک و کشاورزی لازم است. از آنجا که کیفیت خاک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، بنابراین از ویژگی‌های مربوطه باید استنتاج شود. ویژگی‌های کیفیت خاک، مجموعه‌های از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک هستند که به تغییر کاربری اراضی، مدیریت یا عملیات حفاظتی حساس می‌باشند (۶). به دلیل این که تفسیر تعداد زیادی از ویژگی‌های خاک و نتیجه‌گیری از آنها بسیار

مشکل است، این ویژگی‌ها در یک شاخص تحت عنوان شاخص کیفیت خاک تلفیق می‌شوند. شاخص‌های کیفیت خاک یک راه آسان و معمول جهت ارزیابی کیفیت خاک می‌باشد (۴) و می‌توانند منجر به بهبود فهم اکوسیستم‌های خاک و مدیریت مؤثر خاک شوند (۲۹). شاخص کیفیت وزنی تجمعی خاک^۱ یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک است که برای اهداف مختلف توسط پژوهشگران پرشماری به کار برده شده است (۹، ۱۴، ۲۵، ۲۹، ۳۱ و ۴۳). نقشه‌برداری شاخص کیفیت خاک با مشخص کردن مناطق با کیفیت پایین خاک، برای افزایش تولیدات زراعی و مدیریت بهتر اراضی ضروری است. این در حالی است که بررسی تغییرات شاخص کیفیت خاک به شیوه‌های مرسوم به ویژه در مناطق با وسعت

1- Weighted additive soil quality index

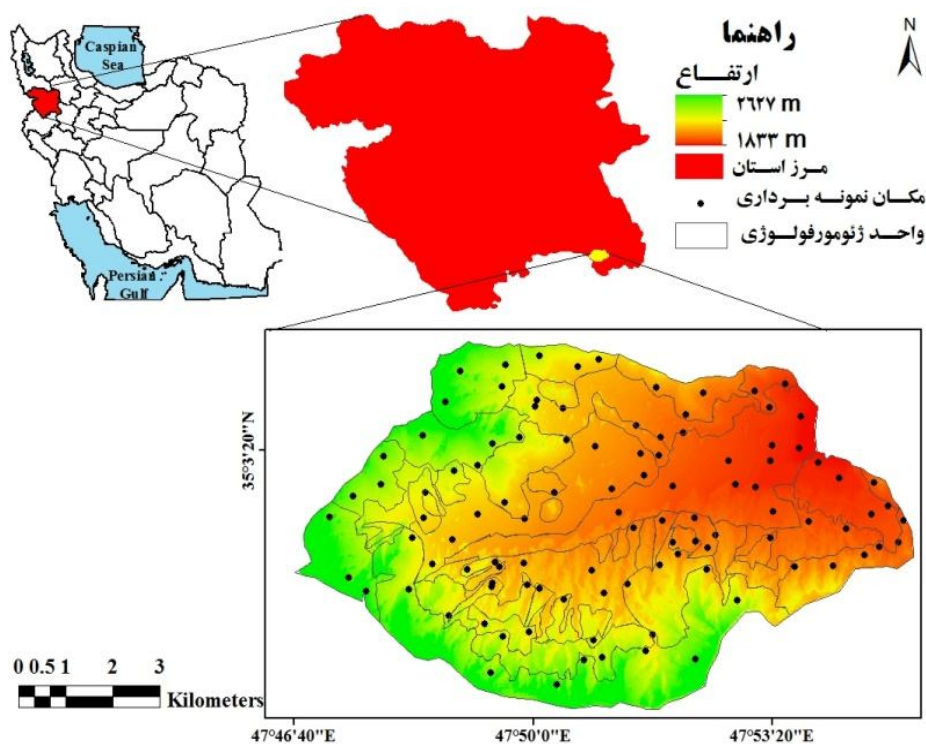
رقومی خاک استفاده شده است (۲، ۳۱، ۳۴، ۳۵ و ۴۱). اگرچه پژوهش‌های مختلفی در زمینه نقشه‌برداری رقومی انجام شده است اما مطالعات اندکی تاکنون در مورد نقشه‌برداری رقومی شاخص کیفیت خاک انجام شده است (۳۰ و ۳۱). منطقه قروه یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در استان کردستان و ایران است که تهیه نقشه شاخص کیفیت خاک جهت افزایش تولید محصولات و مدیریت بهتر خاک و جلوگیری از تخریب آن ضروری می‌باشد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی کیفیت خاک با استفاده از نقشه‌برداری رقومی شاخص کیفیت خاک در منطقه قروه کردستان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی: منطقه مورد مطالعه با وسعت ۶۵۰۰ هکتار بوده که در جنوب شرقی شهرستان قروه (شامل روستاهای مجیدآباد، نعمت‌آباد، ولی‌آباد، میهم‌علیا، میهم‌سفلی، میمنت‌آباد، شکرآباد) در استان کردستان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه ۱۹۲۰ و ۳۲۴۰ متر از سطح دریا است. متوسط بارندگی سالیانه ۳۶۹/۸ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۰/۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب زیریک و مزیک می‌باشد. کاربری‌های اصلی منطقه شامل زراعت و مرتع می‌باشد.

زیاد، گران و زمان‌بر است. از این رو برای پایش و بررسی روند تغییرات شاخص کیفیت خاک در سطوح گسترده نیاز به روش‌هایی می‌باشد که بتواند به راحتی سطح گسترده‌ای از مناطق را پایش کرده و روند کیفیت خاک را مورد بررسی قرار دهد. یکی از راه‌ها استفاده از تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک است. در نقشه‌برداری رقومی خاک، ویژگی خاک بر اساس ارتباطشان با متغیرهای محیطی به صورت رقومی نقشه‌برداری می‌شوند (۲۷). نقشه‌برداری رقومی در واقع توسعه یک مدل عددی یا آماری از رابطه بین متغیرهای محیطی و ویژگی خاک است که برای داده‌های جغرافیایی به منظور تولید نقشه رقومی به کار می‌رود. در نقشه‌برداری رقومی رابطه تغییرات یک ویژگی خاک با عوامل خاک‌سازی، مانند توپوگرافی، آب‌وهوا، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و نوع خاک بیان می‌شود به این صورت که در هر موقعیت مشاهده خاک، یک سری متغیرهای محیطی وجود دارد که همبستگی بالایی با خصوصیات خاک دارند که یافتن این ارتباط و پیش‌بینی ویژگی یا کلاس‌های خاک در نقاط دیگر، منجر به تهیه نقشه رقومی ویژگی خاک در تمام منطقه مورد مطالعه می‌گردد (۲۷). مهم‌ترین داده‌های کمی استفاده شده در نقشه‌برداری رقومی، نقشه مدل ارتفاع رقومی، نقشه ژئومورفولوژی و داده‌های تصاویر ماهواره‌ای هستند (۱، ۱۸، ۳۸ و ۳۹). جنگل تصادفی مدل توسعه‌یافته از مدل طبقه‌بندی و رگرسیون درختی می‌باشد که داده‌های مشاهداتی و متغیرهای کمکی را به طور تکراری برای به دست آوردن ارتباط بهینه بین متغیر پاسخ و متغیرهای مستقل و انجام تخمین جداسازی می‌کند. مدل جنگل تصادفی^۱ توسط پژوهشگران مختلف در نقشه‌برداری

1- Random forest



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعاتی و پراکنش مکانی نقاط نمونه برداری.

Figure 1. Location of study area and spatial variability of sampling points.

هیدرومتری (۱۶)، شدت تنفس میکروبی به روش تصاعد دی اکسید کربن (۳)، سدیم محلول به وسیله دستگاه فلیم فتومتر و مقدار کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره اشباع خاک از طریق تیتراسیون با EDTA (۱۹)، نسبت جذب سطحی سدیم (SAR) به وسیله سدیم، کلسیم و منیزیم محلول و درصد سنگریزه به روش حجمی اندازه گیری شد.

محاسبه شاخص کیفیت خاک: با توجه به آنکه ویژگی های مورد بررسی جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک دارای واحدهای مختلفی بوده و قابل جمع یا ضرب نمودن نیستند، هر ویژگی کیفیت خاک برای بی واحد شدن در محدوده ۰ تا ۱ با استفاده از توابع استاندارد نمره دهی (SSF)^۱ نمره آنها

نمونه برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی: بر اساس نقشه ژئومورفولوژی و تغییرات واحدهای ژئومورفیک مکان ۱۰۵ نقطه انتخاب و سپس نمونه برداری از عمق ۰-۲۰ سانتی متری صورت گرفت (شکل ۱). علاوه بر این ۱۷ پروفیل خاک حفر و تشریح شدند (۳۷). در ۲ میلی متری، هدایت الکتریکی و اسیدیته در عصاره گل اشباع به ترتیب با دستگاه های هدایت سنج الکتریکی و pH متر (۲۸)، کربنات کلسیم معادل به روش حجم سنجی (۲۸)، کربن آلی به روش والکلی- بلک (۳۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (۱۰)، جرم ویژه ظاهری به روش استوانه های فلزی (۸)، ازت کل به روش کنجدال (۲۱)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (۳۳)، بافت خاک به روش

1- Standard Scoring Function

که در آن، W_i وزن هر ویژگی، N_i مقدار نمره هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌ها می‌باشد.

نقشه‌برداری رقومی شاخص کیفیت خاک

داده‌های کمکی: در نقشه‌برداری رقومی خاک، علاوه بر داده‌های خاک نیاز به داده‌های کمکی می‌باشد. در مطالعه حاضر، از دو سری داده کمی و کیفی به‌عنوان داده‌های کمکی استفاده گردید.

داده کیفی: در منطقه مورد مطالعاتی نقشه ژئومورفولوژی بر اساس روش سلسله‌مراتبی تهیه گردید (۴۰). ابتدا بر روی عکس‌های هوایی منطقه روکش شفاف‌ی قرار داده شد تا خطوط سطوح ژئومورفیک روی آن‌ها ترسیم شود. برای تفکیک ژئومورفیک از سیستم استریوسکپی برای تشخیص تفاوت‌ها استفاده شد. در مراحل بعد، عکس‌ها و روکش‌های وارد سامانه جغرافیایی شده و مرزهای ترسیم‌شده بر روکش عکس‌ها رقومی شدند. سپس در نهایت نقشه ژئومورفولوژی با استفاده تاثیر دادن فاکتورهای دیگری هم‌چون زمین‌شناسی، شیب و ارتفاع در مرزهای رقومی شده تهیه شد (شکل ۲ و جدول ۱).

داده کمی: پارامترهای زمین‌نما (۱۰ پارامتر) شامل جهت شیب، ارتفاع، فاکتور LS^2 ، شاخص خیزی، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا^۳، شیب، انحنا طولی، انحنا عرضی، شاخص هم‌گرایی و عمق دره در محیط سامانه جغرافیایی ساگا از نقشه مدل رقومی ارتفاع استخراج گردید (شکل ۱). هم‌چنین از باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست با سنجنده ETM^+ به‌عنوان داده کمکی استفاده گردید. علاوه بر این شاخص گیاهی تعدیل‌کننده اثر

آن‌ها مشخص شد (۲۲). سه تابع کلی استاندارد نمره‌دهی تحت عنوان بیش‌تر بهتر (برای ویژگی‌های که افزایش آن‌ها موجب بهبود کیفیت خاک می‌شود هم‌چون ظرفیت تبادل کاتیونی)، کم‌تر بهتر (برای ویژگی‌های که افزایش آن‌ها موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود هم‌چون SAR) و بهینه وجود دارد (برای ویژگی‌های که افزایش یا کاهش آن‌ها بیش از حد بهینه موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود هم‌چون pH) وجود دارد. در این پژوهش بر اساس بررسی منابع و وضعیت ویژگی‌ها در منطقه تابع بیش‌تر بهتر برای ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی خاک، فسفر در دسترس، ازت کل، تنفس میکروبی، درصد رس، درصد سیلت، تابع کم‌تر بهتر برای ویژگی‌های درصد شن، سنگریزه خاک، SAR، کربنات کلسیم معادل، جرم مخصوص ظاهری و تابع بهینه برای ویژگی‌های pH و هدایت الکتریکی استفاده شد (۵، ۱۳، ۱۷ و ۲۴). حدود آستانه ۷ (۵) و محدوده ۰/۲ تا ۲ دسی‌زیمنس بر متر (۶) به‌ترتیب برای ویژگی‌های pH و هدایت الکتریکی جهت نمره‌دهی بر اساس تابع نمره‌دهی بهینه استفاده شد. سپس جهت وزن‌دهی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده کیفیت خاک ابتدا سهم هر ویژگی^۱ به روش تجزیه عاملی^۲ در محیط SPSS نسخه ۲۰ محاسبه شد و سپس وزن هر ویژگی از تقسیم مقدار سهم آن ویژگی بر سهم کل ویژگی‌ها در هر مجموعه محاسبه شد. در نهایت ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در رابطه ۱ وارد شده و شاخص‌های کیفیت وزنی تجمعی محاسبه شد.

$$SQLw \sum_{i=1}^n WiNi \quad (1)$$

3- LS factor

4- Multi-resolution Valley Bottom Flatness

1- Communalilty

2- Factor analysis

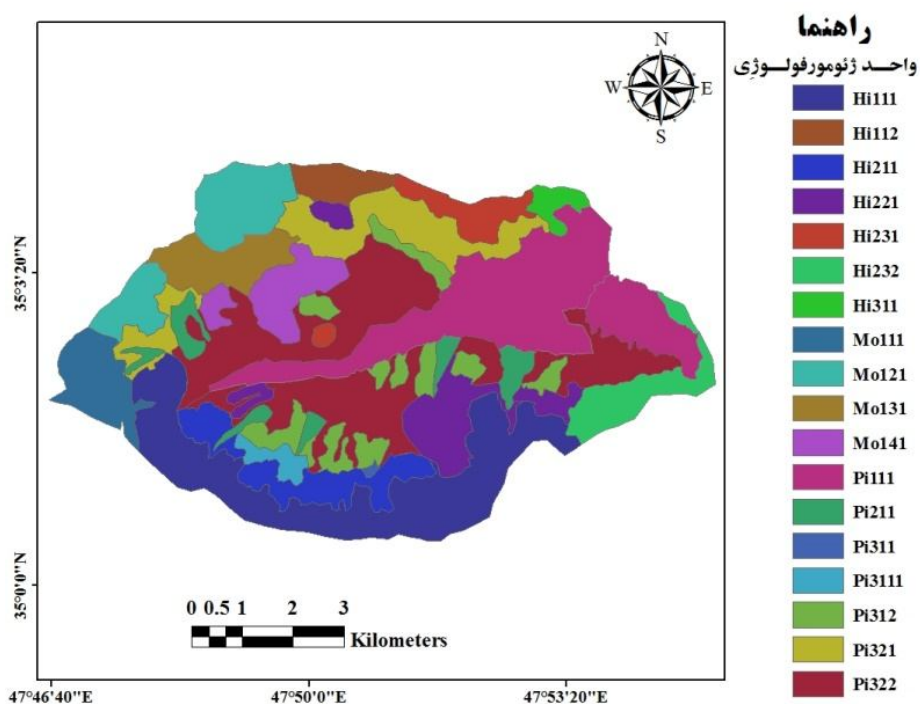
$$\text{Brightness Index} = \sqrt{\text{Red}^2 + \text{NIR}^2} \quad (۴)$$

که در آن‌ها، NIR باند مادون قرمز، RED باند قرمز و L فاکتور تعدیل‌کننده اثر خاک (پوشش تنک برابر ۱، پوشش متوسط برابر ۰/۵ و پوشش انبوه ۰ یا ۰/۲۵) می‌باشد.

خاک (SAVI)^۱، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)^۲ و شاخص روشنایی (BI)^۳ نیز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.3 از ترکیب باندها محاسبه گردید (رابطه‌های ۲، ۳ و ۴).

$$\text{SAVI} = \text{NIR} - \text{RED} / (\text{NIR} + \text{RED} + L)^{1+L} \quad (۲)$$

$$\text{NDVI} = \text{Red} - \text{NIR} / (\text{RED} + \text{NIR}) \quad (۳)$$



شکل ۲- نقشه ژئومورفولوژی.

Figure 2. Geomorphology map.

- 1- Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)
- 2- Normalized difference vegetative index
- 3- Brightness index

جدول ۱- راهنمای نقشه ژئومورفولوژی.

Table 1. Legend of geomorphology map.

زمین‌نما Landscape	لندفرم Landform	تپه‌های فرسایشی با ارتفاع زیاد (Hi1) تپه‌های فرسایشی با ارتفاع متوسط (Hi2) تپه‌های فرسایشی با ارتفاع متوسط (Hi2)	سنگ‌شناسی Lithology	سطوح ژئومورفیک Geomorphic surfaces
	(Hi1) زیاد	مزدبورت کوارتزموزنویت و گرانیت ایدوتیز (Hi11) گابرو و گابرو دیوریتو (Hi12)		دامنه شیب با شیب زیاد (Hi111) دامنه شیب با شیب زیاد (Hi112)
(Hi)		مزدبورت کوارتزموزنویت و گرانیت ایدوتیز (Hi21) مزدبورت کوارتزموزنویت و گرانیت ایدوتیز (Hi22) گرانیت، آملیور، گرانیت، گرانودیوریت و کوارتز موزونیت (Hi22)		دامنه شیب با شیب متوسط (Hi211) دامنه شیب با شیب متوسط (Hi212) دامنه شیب با شیب متوسط (Hi221) دامنه شیب با شیب متوسط (Hi231) دامنه شیب با شیب متوسط (Hi232) دامنه شیب با شیب متوسط (Hi241)
(Pi)	فن (Pi1) فلات (Pi2)	آملیور، شیبست و مرمر (Hi24) گرانیت (Pi11) آبرفت (Pi21)		پستی و بلندی متوسط با ابراهه‌های نسبتاً عمیق (Pi11) شیب زیاد (Pi211) شیب متوسط (Pi212) شیب متوسط (Pi221) شیب کم (Pi222)
دشت رسوبی (Ap)	تراس‌های آبرفتی (Ap1)	گرانیت (Ap11)		تراس‌های مسطح آبرفتی ریز بافت (Ap111)
کوه (Mo)	کوه‌های فرسایشی (Mo1)	گرانیت (Mo11) دیوریت (Mo12) گابرو (Mo13) گابرو دیوریتو (Mo14)		دامنه کوه (Mo111) دامنه کوه (Mo121) دامنه کوه (Mo131) دامنه کوه (Mo141)

می‌گردد و متغیر حذف شده پیش‌بینی می‌گردد. این فرآیند برای همه موقعیت‌های نمونه‌برداری انجام می‌شود. سپس داده‌های تخمینی به دست آمده با مقادیر واقعی مقایسه می‌گردند و خطای پیش‌بینی محاسبه می‌شود. مدل مناسب، با استفاده از ضریب تبیین (رابطه ۴)، شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (رابطه ۵) و میانگین خطای مدل (رابطه ۶) که واحد اندازه‌گیری‌شان درصد است تعیین گردید.

$$R^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_o - Z_p)^2 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_o - Z_p)^2} \quad (7)$$

که در آن‌ها، Z_0 مقادیر پیش‌بینی شده، Z_p مقادیر مشاهداتی، n تعداد داده‌ها، x و y به ترتیب مقادیر مطلق مشاهداتی و پیش‌بینی شده، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است.

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌ها: در جدول ۲ خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آمده است. میانگین هدایت الکتریکی خاک منطقه ۰/۴۴ دسی‌زیمنس بر متر است که نشان‌دهنده میزان کم هدایت الکتریکی خاک منطقه است. دامنه تغییرات آهک ۰ تا ۳۴ می‌باشد که نشان‌دهنده مقدار کم تا نسبتاً زیاد آهک است. مقدار میانگین اسیدیته آن ۸/۲ می‌باشد که نشان‌دهنده بازی بودن pH خاک است. میانگین کربن آلی ۰/۷۵ درصد است که نشان‌دهنده مقدار نسبتاً کم کربن آلی خاک است. کلاس‌های بافت غالب در منطقه شامل لومی، لومرسی و لومرسی‌شنی می‌باشد. میانگین مقادیر فسفر و ازت هم نشان‌دهنده کم بودن این عناصر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

مدل‌سازی و آماده‌سازی داده‌ها: برای پهنه‌بندی شاخص کیفیت خاک در این مطالعه شاخص کیفیت خاک به‌عنوان متغیر وابسته و تمام لایه‌های اطلاعاتی یا کمکی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند و در فرآیند نقشه‌برداری رقومی خاک مورد استفاده قرار گرفتند. هم‌چنین، تمام لایه‌های اطلاعاتی یا کمکی به فرمت رستری تهیه شد. تمامی اطلاعات (داده‌های خاک و متغیرهای محیطی) به فرمت نهایی txt تبدیل شده و برای انجام فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مربوطه آماده شدند. جهت برقراری ارتباط بین متغیرهای کمکی و شاخص کیفیت خاک از مدل جنگل تصادفی استفاده شد. در روش جنگل تصادفی تعداد زیادی درخت طبقه‌بندی تولید می‌شود. یک نمونه (n) که نمونه خودراانداز نامیده می‌شود به‌طور تصادفی با جای‌گذاری از کل داده‌ها (N) انتخاب شده و یک درخت روی این نمونه خودراانداز ساخته می‌شود. سپس در هر گره درخت، گروهی از تخمین‌گر از کل تخمین‌گرها انتخاب می‌شود و بهترین انشعاب با استفاده از این تخمین‌زننده‌ها تعیین می‌گردد. روش جنگل تصادفی دارای تابعی با دو پارامتر $mtry$ و $ntree$ که به ترتیب تعداد متغیرها و تعداد درخت می‌باشد که قابل تغییر بوده و توسط کاربر تعیین می‌شود که در این مطالعه به ترتیب از یک تا ۱۲ و ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متغیر بودند. در پژوهش حاضر از نرم‌افزار R برای ساختن جنگل تصادفی و پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک استفاده شد و در نهایت نقشه رقومی شاخص کیفیت خاک تهیه شد.

ارزیابی مدل و نقشه: برای بررسی ارزیابی نقشه شاخص کیفیت خاک، اعتبارسنجی به روش اعتبارسنجی تقاطعی^۱ انجام گرفت. در این روش ارزیابی پایگاه داده (n) به $n-1$ موقعیت برای واسنجی و یک موقعیت برای اعتبارسنجی تقسیم می‌شود. در هر تکرار، مدل برای موقعیت حذف شده اجرا

1- Cross validation

جدول ۲- پارامترهای آماری مربوط به ویژگی‌های خاک.

Table 2. Statistic parameters of soil properties.

میانگین Mean	حداکثر Maximum	حداقل Minimum	واحد Unit	خصوصیت Characteristic
26.64	44.36	7.60	درصد (%) Percentage (%)	رس Clay
50.72	75.67	5.70	درصد (%) Percentage (%)	شن Sand
22.62	64.16	5.21	درصد (%) Percentage (%)	سیلت Silt
0.57	2.60	0.06	درصد (%) Percentage (%)	کربن آلی Organic Carbon
17.09	34.00	0	درصد (%) Percentage (%)	کربنات کلسیم Carbonate Calcium
0.026	0.05	0.02	درصد (%) Percentage (%)	ازت Nitrogen
24.72	64	1.00	درصد (%) Percentage (%)	سنگریزه Gravel
8.22	8.9	7.00		اسیدیته pH
0.44	1.51	0.02	دسی‌زیمنس بر متر (dSm ⁻¹)	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity
16.80	17.43	16.57	میلی‌گرم بر کیلوگرم (mgkg ⁻¹)	فسفر Phosphorus
1.31	1.80	1.1	گرم بر سانتی‌متر مکعب (gcm ⁻³)	جرم مخصوص ظاهری Bulk Density
14.33	37.82	4.97	سانتی‌مول بار بر کیلوگرم خاک (cmol+kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation Exchange Capacity
2.97	12.00	0.34		نسبت جذب سطحی سدیم SAR
0.60	1.01	0.19	میلی‌گرم گازکربنیک بر گرم خاک در روز (mgco ₂ g ⁻¹ soil.day ⁻¹)	تنفس میکروبی Microbial Respiration

زیر سطحی کمبیک و کلسیک وجه تمایز خاک‌های مورد مطالعه می‌باشند. از جمله فرایندهای بارز خاک‌سازی در این منطقه می‌توان به حرکت و آبشویی کربنات کلسیم در نیمرخ خاک و تجمع مواد آلی در افق‌های سطحی اشاره کرد. همه عوامل بالا

تحول خاک: در منطقه مطالعاتی شرایط ژئومورفولوژیک بر روی بسیاری از ویژگی‌های خاک در مقاطع خاک تأثیر داشته و سطوح مختلف ژئومورفیک توسعه و تکوین خاک‌ها را نیز تحت تأثیر قرار داده است. افق‌های مشخصه سطح‌الارضی اکریک و افق‌های

بعضی ویژگی‌های اصلی خاک را هم‌چون اسیدیته و نگهداری آب و مواد مغذی را کنترل می‌کند (۲۶). دامنه شاخص کیفیت خاک در منطقه بین ۰/۶۷-۰/۲۶ می‌باشد و شرایط ژئومورفولوژیک منطقه مطالعاتی بسیاری از ویژگی‌های خاک و متعاقباً شاخص کیفیت خاک را در منطقه تأثیر قرار داده است. به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار شاخص کیفیت خاک در قسمت‌های بالادست منطقه جایی که شیب زیاد و عمق خاک کم است دیده می‌شود. بیش‌ترین مقدار آن نیز در مناطق میانی و پایین‌دست منطقه جایی که شیب کم و عمق خاک زیاد است مشاهده می‌شود.

مدل‌سازی مکانی: نتایج سه عدد ریشه مربعات خطا، میانگین خطا و ضریب تبیین برای مدل جنگل تصادفی به‌ترتیب ۰/۰۶۲، ۰/۰۴۸ و ۰/۶۵ به‌دست آمد (جدول ۳). هم‌چنین در این روش مقادیر بهینه دو پارامتر mtry و ntree به‌ترتیب ۸ و ۹۰۰ بودند. مطابق با این نتایج مدل جنگل تصادفی دارای دقت نسبتاً مناسب به‌منظور پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک می‌باشد. در شکل ۳ نمودار پراکنش داده‌های پیش‌بینی شده برای مدل جنگل تصادفی ارائه شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود بهترین خط برازش شده دارای زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه بوده که نشان‌دهنده دقت بالای برآورد توسط مدل جنگل تصادفی است. در نهایت نقشه شاخص کیفیت خاک با استفاده از مدل جنگل تصادفی در محیط ArcGIS 10.3 تهیه شد که دامنه تغییرات آن بین ۰/۳-۰/۶۵ می‌باشد (شکل ۴). پژوهشگران دیگری نیز از مدل جنگل تصادفی در نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده کرده‌اند. نبی‌اللهی و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی توزیع مکانی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی و جنگلی منطقه مریوان استان کردستان از

باعث تمایز و تفکیک خاک‌ها منطقه گردیده است که آن‌ها را می‌توان در دو رده طبقه‌بندی کرد که عبارتند از: آنتی‌سولز (Lithic Xerorthents) و Typic Xerorthents) و اینسپتی‌سولز (Typic Haploxerepts و Typic Calcixerepts). خاک‌هایی است که در زمین‌نمای کوه، تپه و فن تشکیل شده‌اند عمدتاً جزو راسته آنتی‌سولز بوده که تکامل پروفیلی چندانی که دلیل این موضوع شیب زیاد و عدم پایداری سطوح ژئومورفیک است. فرسایش و شیب زیاد و در نتیجه نداشتن فرصت کافی برای رسوبگذاری عواملی هستند که تکامل ناچیز این پروفیل‌ها را توجیه می‌نماید. خاک‌هایی است که در فلات‌های کم شیب و دشت‌های دامنه‌ای تشکیل شده‌اند در راسته اینسپتی‌سولز قرار گرفته‌اند. از فرایندهای مهم خاک‌سازی در این قسمت می‌توان به فرآیند کلسیفیکیشن اشاره کرد.

شاخص کیفیت خاک: بر اساس آنالیز واریانس مشترک (سهم هر ویژگی) جرم مخصوص ظاهری خاک، شن، ظرفیت تبادل کاتیونی، رس، دارای بیش‌ترین وزن (۰/۱)، سنگریزه و SAR دارای کم‌ترین وزن (۰/۰۵) و سایر ویژگی‌ها شامل pH، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، شدت تنفس میکروبی، ازت کل، فسفر قابل‌دسترس و ظرفیت تبادل کاتیونی دارای اوزان متوسط (۰/۰۶-۰/۰۹) بودند. بافت خاک (به‌عنوان درصد نسبی ذرات شن، سیلت و رس) و جرم مخصوص ظاهری از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک هستند که بر روی رطوبت، ویژگی‌های هیدرولیکی، حاصلخیزی، بیولوژی و فرسایش خاک موثر هستند (۷، ۱۲ و ۴۲) ظرفیت تبادل کاتیونی هم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های کیفیت خاک

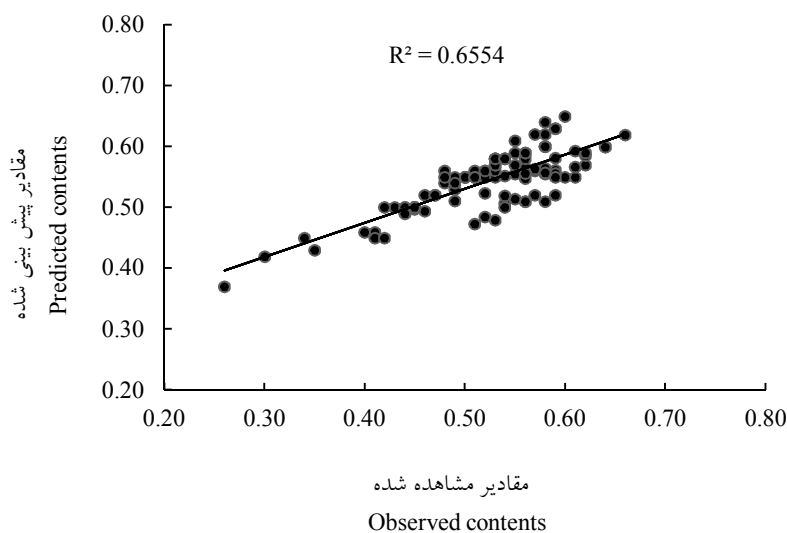
جهت پیش‌بینی اندوخته کربن آلی خاک در نیجریه از مدل‌های جنگل تصادفی، کیویست و رگرسیون درختی داده‌های کمکی استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای تصویر ماهواره‌ای (باندهای ۱، ۲ و ۳، شاخص NDVI)، پارامترهای سرزمین (شیب و شاخص خیزی)، نقشه خاک، نقشه زمین‌شناسی، داده‌های اقلیم (بارندگی و دما) و کاربری اراضی مهم‌ترین داده‌های کمکی جهت پیش‌بینی اندوخته کربن آلی خاک می‌باشد (۲). تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) برای تهیه نقشه رقومی کربن آلی خاک در منطقه بانه استان کردستان، از متغیرهای کمکی داده‌های سنجش‌ازدور، پارامترهای سرزمین استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین متغیرهای کمکی جهت پهنه‌بندی کربن آلی خاک شاخص NDVI، شاخص رس، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا و شاخص خیزی بودند (۳۹). پهلوان‌راد و همکاران (۲۰۱۸) جهت پیش‌بینی بافت خاک و pH در دشت‌های سیلابی استان سیستان و بلوچستان از مدل جنگل تصادفی و داده‌های کمکی استفاده کردند که نتایج نشان داد فاصله تا رودخانه، شبکه کانال، ارتفاع، عمق دره، فاکتور LS، شاخص شوری نرمال شده، شاخص روشنایی و فاصله عمودی تا شبکه کانال مهم‌ترین متغیرهای کمکی بودند (۳۵).

مدل جنگل تصادفی استفاده کردند که نتایج آن‌ها ضرایب همبستگی ۰/۸۲ و ۰/۷۳ را جهت پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک نشان داد (۳۰). پهلوان‌راد و همکاران (۲۰۱۴) جهت به‌روز کردن نقشه‌های قدیمی کلاس خاک تا سطح گروه بزرگ، تحت‌گروه و سری از مدل جنگل تصادفی استفاده کردند که به‌ترتیب خطای عمومی ۴/۵، ۵۱/۵ و ۵۶/۶ را نشان داد (۳۴). همچنین در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش نتایج نشان داد که متغیرهای کمکی شیب (۳۰٪)، شاخص SAVI (۸٪)، شاخص خیزی (۹٪)، شاخص همواری دره (۲۰٪)، فاکتور LS (۱۲/۵٪)، ارتفاع (۷٪)، شاخص NDVI (۶٪) و نقشه ژئومورفولوژی (۱۰٪) بالاترین تأثیر را بر روی پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک را در منطقه مورد مطالعه دارند. این موضوع نشان‌دهنده آن است که در منطقه مورد مطالعه، پستی و بلندی و پوشش گیاهی از مهم‌ترین فاکتورهای خاک‌سازی بوده و در توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک مؤثر می‌باشد، چون توپوگرافی و پوشش گیاهی هر منطقه یکی از ویژگی‌های مهم و تأثیرگذار بر ویژگی‌های خاک آن منطقه می‌باشد که متعاقباً بر روی کیفیت خاک مؤثر می‌باشند. نتایج پژوهش‌های زیادی بیانگر رابطه پارامترهای سرزمین، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه ژئومورفولوژی با ویژگی‌های خاک بوده است. آکپا و همکاران (۲۰۱۶)

جدول ۳- نتایج مدل برای پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک.

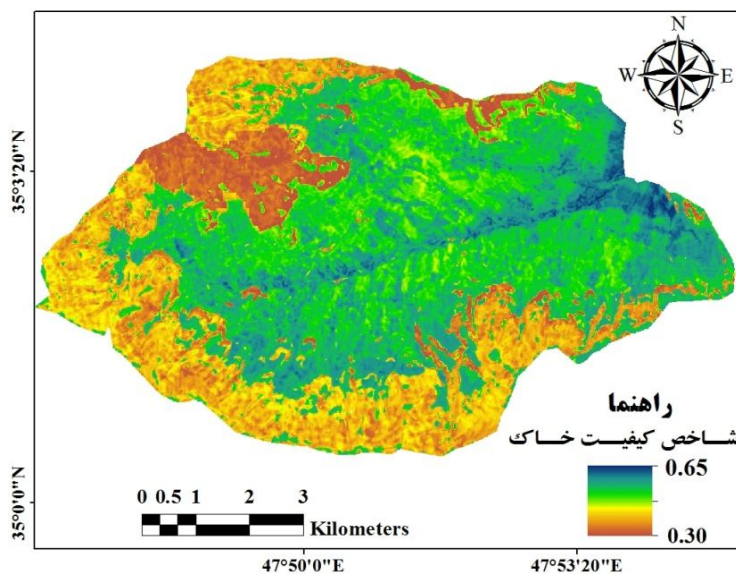
Table 3. Results of models to estimate soil quality index.

ntree	mtry	میانگین خطا Mean error	ضریب همبستگی Correlation coefficient	ریشه مربعات خطا Root mean score error	مدل Model
۹۰۰	۸	0.048	0.65	0.062	جنگل تصادفی Random forest



شکل ۳- نتایج مدل جنگل تصادفی برای تخمین شاخص کیفیت خاک.

Figure 3. Results of random forest model to estimate soil quality index.



شکل ۴- نقشه شاخص کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه.

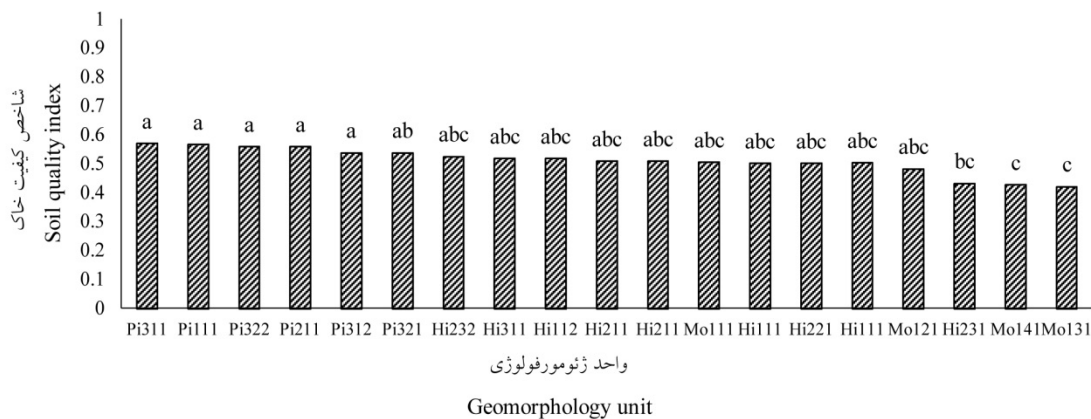
Figure 4. Soil quality index map of the study area.

شکل ۵ به ترتیب میانگین شاخص کیفیت خاک را در واحدهای مختلف ژئومورفولوژی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. میانگین مقادیر شاخص کیفیت خاک در واحدهای ژئومورفولوژی با شیب زیاد (فیزیوگرافی کوه و تپه) هم‌چون Mo131، Mo141

تجزیه و تحلیل مکانی شاخص کیفیت خاک: مطابق با شکل ۴ کم‌ترین مقادیر شاخص کیفیت خاک در مناطق مرتفع شمالی، شمال‌غربی و شمال‌شرقی در بالادست حوزه به دلیل برخورداری از شیب زیاد، عمق کم خاک و پوشش گیاهی نسبتاً کم تخمین زده شد.

رسوب می‌کنند. نتایج پژوهش‌های زیادی بیانگر اثر اجزاء توپوگرافی بر ویژگی‌های خاک هم‌چون بافت خاک، ماده آلی، ضخامت خاک و کلاس خاک، درصد سنگریزه و متعاقب آن کیفیت خاک بوده است (۱۱). نبی‌اللهی و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی اثر درصد شیب بر روی شاخص کیفیت خاک در منطقه دهگلان استان کردستان نشان دادند که کلاس شیب بیش‌تر از ۱۰ درصد دارای کم‌ترین میزان شاخص کیفیت خاک در مقایسه با کلاس‌های با شیب کم‌تر بود (۳۰). رضایی و گیلکز (۲۰۰۵) نشان دادند که بسیاری از ویژگی‌های خاک مانند ضخامت خاک، ظرفیت نگهداری، درصد سنگریزه درشت، رس، شن، کربن آلی به‌طور معنی‌داری به جهت و درصد شیب وابسته است (۳۶). درجه شیب با تأثیر بر میزان رواناب تولیدی، زهکشی، درجه حرارت خاک و میزان فرسایش آن، در فرآیند تشکیل خاک مؤثر است (۲۰).

و Hi23 کم‌ترین و در واحدهای با شیب کم (فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای و فلات) هم‌چون Pi312, Pi211, Pi322, Pi311, Pi111 بیش‌ترین بود که از لحاظ آماری هم این اختلاف معنی‌داری می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که در منطقه مورد مطالعه، پستی و بلندی از مهم‌ترین فاکتورهای خاک‌سازی بوده و در توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک و ویژگی‌های آن مؤثر می‌باشد، چرا که توپوگرافی هر منطقه یکی از ویژگی‌های مهم و تأثیرگذار بر ویژگی‌های خاک آن منطقه می‌باشد. خاک‌های واقع در کوه‌ها و شیب‌تپه‌ها معمولاً کم عمق‌تر از خاک‌های واقع در اراضی پست‌تر هستند و اغلب با فرایندهای فرسایش و انتقال رسوبات همراه هستند، در حالی‌که تهره‌ها مناطق مسطح‌تری نسبت به سایر مناطق اطراف در یک زمین‌نما می‌باشد و معمولاً محیط‌های رسوبی هستند که رسوبات در آن‌ها



شکل ۵- میانگین شاخص کیفیت خاک در واحدهای ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه (میانگین‌های که حروف مشترک دارند مطابق با آزمون دانکن در سطح ۱ درصد اختلاف معنی‌داری باهم ندارند (مقدار $P > 0.05$)).

Figure 5. Mean value of soil quality index in geomorphology units of the study area using. Means (n = 5) that share a letter are not significantly different at the level 0.01 ($P > 0.05$) according to Duncan's test.

شاخص کیفیت خاک در قسمت‌های پایین‌دست منطقه با واحد ژئومورفولوژی که دارای شیب زیاد، عمق کم خاک و پوشش گیاهی ضعیف می‌باشند مشاهده شد. مهم‌ترین متغیر کمکی در پیش‌بینی

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر از مدل جنگل تصادفی جهت بررسی تغییرات مکانی شاخص کیفیت خاک در منطقه قروه استان کردستان استفاده شد. بیش‌ترین میزان

نشان داد که مدل جنگل تصادفی دارای دقت نسبتاً مناسب جهت پیش‌بینی شاخص کیفیت خاک می‌باشد و پیشنهاد می‌گردد جهت نقشه‌برداری کیفیت خاک در سایر مناطق نیز به‌کار برده شود.

شاخص کیفیت خاک در منطقه شیب، شاخص SAVI، شاخص خیسی، شاخص همواری‌دره، فاکتور LS، ارتفاع، شاخص NDVI و نقشه ژئومورفولوژی می‌باشد. نتایج بر اساس آماره‌های آماری (ضریب تبیین، میانگین خطا و میانگین ریشه مربعات خطا)

منابع

1. Adhikari, K., Minasny, B., Greve, B.G., and Greve, M.H. 2014. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*. 214-215: 101-113.
2. Akpa, S.I.C., Odeh, I.O.A., Bishop, F.A., Hartemink, A.E., and Amapu, I.Y. 2016. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria. *Geoderma*. 271: 202-215.
3. Anderson, E., and John, P. 1982. Soil respiration, P 831-870. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*, 2nd ed. *Agronomy Monograph*. 9: ASA, Madison, WI.
4. Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, K.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., and Munk, D.S. 2002. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agron. J.* 94: 12-23.
5. Andrews, S.S., Karlen, D.L., and Cambardella, C.A. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 68: 1945-1962.
6. Askari, M.S., O'Rourke, S.M., and Holden, M.M. 2015. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible-near-infrared spectroscopy. *Geoderma*. 243-244: 80-91.
7. Benedetto, A. 2010. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain. *J. Appl. Geophys.* 71: 26-35.
8. Blake, G.R., and Hartage, K.H. 1986. Bulk density, P 363-382. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. *Agronomy Monograph*. 9: ASA, Madison, WI.
9. Biswas, S., Hazra, G.C., Purakayastha, T.J., Saha, N., Mitran, T., Roy, S.S., Basak, N., and Mandal, B. 2017. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*. 292: 34-48.
10. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*. 73: 251-262.
11. Cedia, M.B., Vieira, S.R., Villela, L.O., Mota, L.S., Anjos, H.C., and Carvalho, F.D. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agricola*. 66: 338-352.
12. Chau, J.F., Bagtzoglou, A.C., and Willig, M.R. 2011. The effect of soil texture on richness and diversity of bacterial communities. *Environmental Forensics*. 12: 333-341.
13. Chen, Y.D., Wang, H.Y., Zhou, J.M., Xing, L., Zhu, B.S., Zhao, Y.C., and Chen, X.Q. 2013. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. *Pedosphere*. 23: 564-576.
14. Das, B., Chakraborty, D., Singh, V.K., Ahmed, M., Singh, A.K., and Barman, A. 2016. Evaluating Fertilization Effects on Soil Physical Properties Using a Soil Quality Index in an Intensive Rice-Wheat Cropping System. *Pedosphere*. 26: 6. 887-894.
15. Doran, J.W., and Parkin, B.T. 1994. Defining and assessing soil quality. P 3-21. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart, (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.

16. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis, P 383-411. In: A. Klute. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*, second edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
17. Guo, L., Sun, Z.H., Ouyang, Z.H., Han, D., and Li, F. 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena*. 152: 135-143.
18. Jafari, A., Finke, P.A., de Wauw, J.V., Ayoubi, S., and Khademi, H. 2012. Spatial prediction of USDA- great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *Europ. J. Soil Sci.* 63: 284-298.
19. Jayachandran, K., Gamare, J.S., Nair, P.R., Xavier, M., and Aggarwal, S.K. 2012. A novel biamperometric methodology for thorium determination by EDTA complexometric titration. *Radiochimica Acta*, 100: 311-314.
20. Jiang, P., and Thelen, K.D. 2004. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn soybean cropping system. *Agron. J.* 96: 252-258.
21. Jones, B.J. 2001. *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. Boca Raton, London, New York & Washington, D.C. CRC Press, 384p.
22. Karlen, D.L., and Scott, D.E. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. P 53-72. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicsek, B.A. Stewart (eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
23. Karlen, D.L., Gardner, J.C., and Rosek, M.J. 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *J. Prod. Agric.* 11: 56-60.
24. Lal, R. 1994. *Methods and Guidelines for Assessing Sustainable Use of Soil and Water Resources in the Tropics*. The Ohio State University, 78p.
25. Lin, Y., Deng, H., Du, K., Li, j., Lin, H., Chen, C., Fisher, L., and Wu, C. 2017. Soil quality assessment in different climate zones of China's Wenchuan earthquake affected region. *Soil & Tillage Research*. 165: 315-324.
26. Manrique, .L.A., Jones, C.A., and Dyke, P.T. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50: 787-794.
27. McBratney, A.B., Santos, M.L.M., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117: 3-52.
28. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, P 199-224. 9. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, 2nd ed. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
29. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, M., Kerry, R., and Moradian, Sh. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province. *Iran. Ecological Indicators*. 83: 482-494.
30. Nabiollahi, K., Golmohammadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, M., and Kerry, R. 2018a. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*. 318: 482-494.
31. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, M., and Eskandari, Sh. 2018b. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archive of Agronomy and Soil Science*. 64: 5. 482-494.
32. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 539-594. In: A.L. Page, R.H., Miller, and D.R., Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.

33. Olsen, S.R., and Sommers, L. 1982. phosphorus, P 403-430. In: A.L. Page (ed.). Methods of soil analysis, Agron. No. 9, Part 2: Chemical and microbiological properties, American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
34. Pahlavan-Rad, M.R., Toomanian, N., Khormali, F., Brungard, C.W., Komaki, C.B., and Bogaert, P. 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma*. 232-234: 97-106.
35. Pahlavan-Rad, M.R., and Akbarimoghaddam, A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (Case study from eastern Iran). *Catena*. 160: 275-281.
36. Rezaei, S., and Gilkes, R. 2005. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands, *Geoderma*. 125: 167-176.
37. Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th edn. United States Department of Agriculture, Washington, 360p.
38. Taghizadeh-Mehrjardi, R. 2016. Modern concepts in Soil Science (Pedometric). Ardakan University Press, 311p. (In Persian)
39. Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., and Kerry, R. 2016. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*. 253-254: 67-77.
40. Toomanian, N., Jalalian, A., Khademi, H., Karimian Eghbal, M., and Papritz, A., 2006. Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, central Iran. *Geomorphology*. 81: 376-393.
41. Were, K., Bui, D.T., Dick, Q.B., and Singh, B.R. 2015. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an Afromontane landscape. *Ecological Indicators*. 52: 394-403.
42. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. U.S. Dep. Agric. Handb. No. 537. Pp: 1-69.
43. Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Liu, M., Xu, C., Zhang, R., and Luo, W. 2019. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. *Science Total Environment*. 650: 2657-2665.



Digital mapping of soil quality index (Case study: Ghorveh, Kurdistan Province)

L. Rasouli¹, *K. Nabiollahi² and R. Taghizade-Mehrjardi³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, University of Kurdistan,

³Assistant Prof., Dept. of Arid and Desert Regions Management, University of Ardakan

Received: 04.07.2019; Accepted: 10.20.2019

Abstract

Background and Objectives: Soil quality is one of the most important soil properties which investigation of its changes is essential to soil management and degradation. Quantifying soil quality using soil quality index to improve understanding of soil ecosystems is have been widely used. The soil quality index is calculated by measuring some soil characteristics which measuring these properties is expensive and time consuming. Therefore, one of the solutions is the use of digital soil mapping technique that can digitally predict soil properties using auxiliary data and data mining models. The purpose of this research is using a random forest model and auxiliary data for mapping the soil quality index.

Materials and Methods: Based on the geomorphology map, 17 soil profiles and 105 auger samples were taken from a depth of 0-20 cm in the Ghorveh area of Kurdistan Province (covers 6500 ha) and soil texture, organic carbon, cation exchange capacity, electrical conductivity, pH, carbonate calcium equivalent, total nitrogen, available phosphorus, microbial respiration rate, sodium adsorption ratio (SAR), bulk density and gravel percentage were measured and calculated then the soil additive weighted index was calculated. Environmental variables in this research were map geomorphology, terrain attributes and data of ETM⁺ image. Geomorphology map was prepared based on hierarchy method. Terrain attributes (including 10 parameters), soil adjust vegetative index (SAVI), normalized difference vegetative index (NDVI) and brightness index (BI) were computed and extracted using SAGA and Arc GIS software, respectively. To make a relationship between soil quality index and auxiliary data, random forest (RF) model were applied and using cross validation method and statistic criteria including coefficient of determination (R^2), mean error (ME) and root mean square error (RMSE) was validated.

Results: According to the communality (share of each soil indicator), bulk density, sand, cation exchange capacity and clay had the highest weight (≥ 0.1) and gravel and SAR had the lowest weight (≤ 0.05) among the soil quality properties. To predict soil quality index, auxiliary variables including slope, SAVI index, wetness index, MrVBF index, LS factor, elevation, NDVI index and geomorphology map were the most important. The results of this study showed that the random forest model with 0.65, 0.042 and 0.062 for determination of coefficient (R^2), mean error (ME) and root mean square root (RMSE) had a fairly suitable accuracy for prediction of soil quality index. The soil quality index was ranged between 0.3-0.65 and its mean values in geomorphologic units with low gradient and low soil depth (Mo131, Mo141 and Hi231) were the lowest and in geomorphologic units with low slope and high soil depth (Pi111, Pi311, Pi322, Pi211 and Pi312) were the highest which these differences were statistically significant.

* Corresponding Author; Email: k.nabiollahi@uok.ac.ir

Conclusion: In this research, a randomized forest model was used to study the spatial variation of soil quality index in Ghorveh area of Kurdistan province. The geomorphologic conditions of the study area have affected many soil characteristics and subsequently the soil quality index in the region. The soil quality index content was the lowest in highlands of north, northwest and northeast with high slope and low soil depth. The slope was the most important auxiliary variables to predict soil quality index in the region. Based on the results of statistical indices, random forest model also had relatively accurate estimation of the soil quality index. Therefore, it is suggested to map soil properties podometric techniques (such as randomized forest) and auxiliary data such as geomorphologic map, terrain attributes, and satellite images were applied.

Keywords: Geomorphology map, Landsat, Random forest, Soil quality, Terrain attributes