



انجمن ملی مهندسی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۱۰۹-۱۲۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.18161.3376

مقاله کامل علمی - پژوهشی

استفاده از نقشه ویژگی‌های خاک در تولید نقشه‌های تفصیلی دقیق خاک

مریم اوسط^۱، احمد حیدری^{۲*} و آرش سلامی^۳

^۱استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی - باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران،

^۲استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، ایران،

^۳دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، ایران،

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

چکیده

سابقه و هدف: نقشه‌های تفصیلی خاک یکی از ابزارهای ضروری برای دستیابی به مدیریت پایدار می‌باشند. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در نقشه‌برداری رقومی خاک و تلاش در تولید نقشه‌های دقیق، عدم اطمینان کافی به نقشه‌های خاک در بسیاری از مقیاس‌ها همچنان به قوت خود باقی است. مطالعات اخیر عمدتاً بر روش‌های سنجش‌ازدور تمرکز یافته است که ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی خاک را کم‌تر در نظر می‌گیرند. این مطالعه از روش جدید درون‌یابی بین خصوصیات زیرسطحی و مشخصه خاک برای افزایش دقت نقشه‌های تهیه‌شده استفاده نموده است. هدف از این مطالعه تولید نقشه‌های دقیق خاک با دو رویکرد استفاده از سطوح ژئومورفیک و همچنین درون‌یابی ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی خاک در منطقه چالوس است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه به مساحت ۱۰۰ هکتار در روستای باندر از توابع بخش کلاردشت شهرستان چالوس در استان مازندران است. از ضخامت و یا عمق مرز بالایی/پایینی افق‌های مشخصه یا خصوصیات مشخصه خاک به‌عنوان معیار تفکیک واحدهای نقشه خاک استفاده گردید. براساس سیستم جامع رده‌بندی آمریکایی خاک، شش ویژگی مشخصه تأثیرگذار در تفکیک خاک‌های منطقه در سطح فامیل (مرز فوقانی افق کمبیک، مرز فوقانی افق آرچیلک، مرز فوقانی افق کلسیک، ضخامت افق مالیک، ضخامت خاکرخ و آهکی یا غیرآهکی بودن) انتخاب گردید و از درون‌یابی عددی این ویژگی‌ها برای تولید نقشه‌های موضوعی استفاده شد. نقشه نهایی خاک منطقه از تلفیق این شش نقشه موضوعی به‌دست آمد. پس از تهیه نقشه هر یک از خصوصیات خاک به‌صورت مجزا، کلیه نقشه‌های تهیه‌شده با یکدیگر تلاقی داده‌شده و نقشه واحدهای همگن به‌دست آمد. اراضی مرتفع منطقه مزبور به دلیل اکوسیستم منحصربه‌فرد و تأثیر جهت شیب در ایجاد خرداقليم‌ها، تغییرات پوشش گیاهی و تنوع بالای خاک‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. نمونه‌برداری از ۵۶ خاکرخ و ۴۴ مته (به‌منظور بررسی تغییرات در فاصله میان خاکرخ‌ها) به‌صورت

* مسئول مکاتبه: ahaidari@ut.ac.ir

شبکه‌ای نسبتاً منظم با فواصل ۱۰۰ متر انجام شد. به منظور بررسی و توصیف ساختار مکانی متغیرهای موردنظر از نیم‌تغییرنا استفاده شد. وجود روند و ناهمسانگردی داده‌ها نیز موردبررسی قرار گرفت. پس از تهیه منحنی‌های تغییرنا، انتخاب بهترین مدل‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی مقاطع و نیز شاخص RMSS انجام گرفت.

یافته‌ها: در تهیه نقشه خاک با استفاده از روش سطوح ژئومورفیک، از ۲۰ واحد خاک شناسایی شده ۱۲ واحد خاک از نوع همسان و ۸ واحد از نوع اجتماع بود. این در حالی است که تمامی ۲۰ واحد نقشه به‌دست‌آمده از روش درون‌یابی ویژگی‌های زیرسطحی از نوع همسان بودند. این روش دقت بالایی در ترسیم مرز بین واحدهای خاک داشت. تفاوت اصلی این روش با روش‌های سنتی در تولید نقشه‌های تفصیلی خاک، استفاده از درون‌یابی خودکار نظارت‌شده به‌جای درون‌یابی دستی و استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی است.

نتیجه‌گیری: یکی از مزایای عمده این روش استفاده از ویژگی‌های درونی خاک به‌عنوان متغیر کمکی در کنار سایر فاکتورهای اقلیم، توپوگرافی، موجودات زنده، مواد مادری و زمان است. این مطالعه بر اهمیت نقش فاکتور S در مدل SCORPAN تأکید کرده و نشان داد که ویژگی‌های درونی خاک که به‌طور مستقیم در رده‌بندی خاک دخالت دارد، به‌طور مؤثری می‌توانند در تفکیک واحدهای خاک استفاده گردند.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، ژئومورفولوژی، نقشه خاک

مقدمه

نبوده و به میزان زیادی به دانش و تجربه کارشناس و درک او از روابط خاک و محیط وابسته است (۱۲). تعمیم ویژگی‌های مربوط به خاکرخ شاهد به کل واحد نقشه، بدون در نظر گرفتن تغییرات مکانی خاک‌ها یکی از بزرگ‌ترین محدودیت‌های مطالعات مرسوم خاک می‌باشد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ نقش ژئومورفولوژی در درک و نقشه‌برداری تغییرات خاک با عنوان ژئوپدولوژی موردتوجه قرار گرفت (۴۳).

ژئوپدولوژی روش سیستماتیک تجزیه و تحلیل سطوح ژئومورفیک است که سعی دارد با بررسی جامع روابط بین خاک و ژئومورفولوژی اقدام به نقشه‌برداری خاک نموده و کوچک‌ترین واحد نقشه را که دارای بالاترین میزان همگنی و یکنواختی است، تفکیک و معرفی کند. روش ژئوپدولوژی در نقشه‌برداری خاک‌های مناطق کوهستانی با دسترسی محدود از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است (۳۳). در سال‌های اخیر، نقشه‌برداری خاک به‌دلیل رشد

توسعه کشاورزی دقیق و افزایش اهمیت تصمیمات مدیریتی، نیاز به نقشه‌های تفصیلی و دقیق خاک را افزایش داده است (۴۱ و ۳۴). تمامی فعالیت‌های زیست‌محیطی و کشاورزی معمولاً به اطلاعات دقیقی در زمینه توزیع مکانی انواع خاک‌ها و ویژگی‌های آن‌ها نیاز دارند (۱، ۱۶، ۳۴). کیفیت و دقت نقشه‌های خاک علاوه بر مقیاس مطالعه و نوع و میزان تجزیه‌های آزمایشگاهی، به میزان زیادی به روش و تکنیک‌های نقشه‌برداری وابسته است (۲). نقشه‌های رایج به‌دلیل ماهیت پیوسته خاک‌ها در بسیاری از مقیاس‌ها از دقت چندانی برخوردار نیستند (۱۶، ۱۸، ۲۹). به‌طورکلی اساس نقشه‌برداری مرسوم بر پایه تفسیر عکس‌های هوایی و تخمین ذهنی پراکنش خاک‌ها استوار است. این روش خاک‌های مشابه را به ترکیب مشخصی از فاکتورهای خاک ساز اختصاص می‌دهد (۸، ۲۱). در نتیجه این روش عاری از خطا

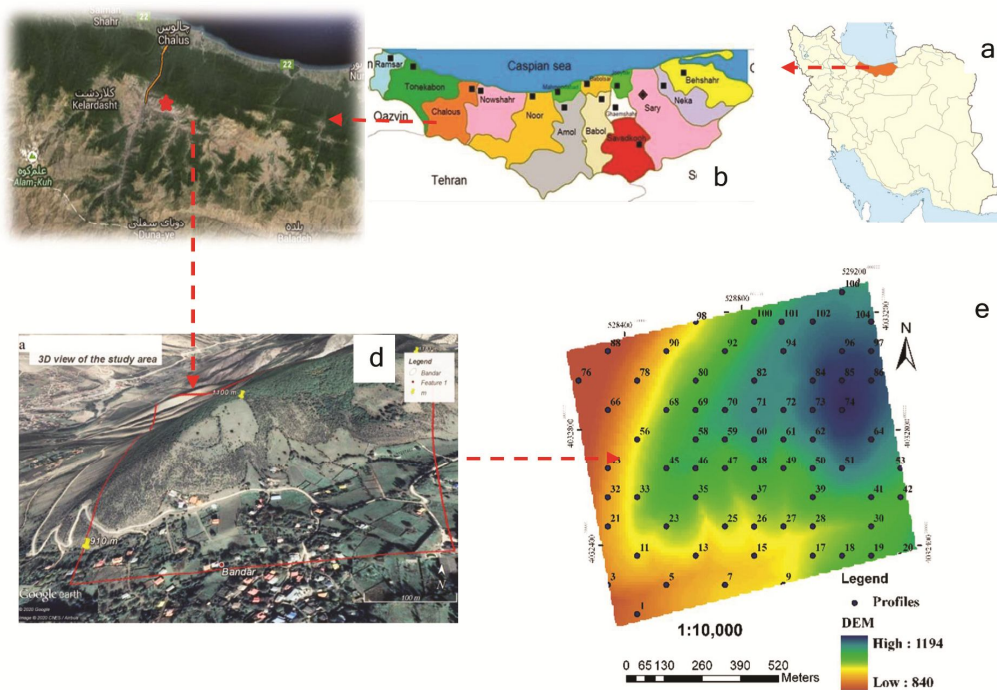
به دست آمده از سنجش از دور محدود شده است (۲۵). به وضوح می توان گفت که داده های سنجش از دور غالباً ویژگی های سطحی خاک ها را منعکس کرده و ویژگی های درونی و زیرسطحی خاک را نادیده می گیرند. از طرف دیگر، استفاده از تصاویر ماهواره ای در نقشه برداری خاک به دلیل تداخلات پوشش های گیاهی بر رفتار ثبت شده خاک ها توسط سنجنده ها می تواند مسأله ساز باشد (۲۳). بنابراین نحوه استفاده کارآمد از فاکتور (S) در نقشه برداری رقومی خاک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. نقشه های تفصیلی خاک به شبکه مترکم نمونه برداری و حجم وسیعی از مطالعات آزمایشگاهی نیازمند است. باین حال تولید این گونه نقشه ها از ارزش بسیاری برخوردار هستند (۲۱). به منظور تولید نقشه های تفصیلی دقیق از درون یابی داده های آزمایشی به دست آمده از نمونه برداری شبکه ای خاک استفاده کرد. در این رویکرد از ضخامت و یا عمق مرز بالایی/ پایینی افق های خاک با ویژگی های مشخصه به عنوان معیار تفکیک واحدهای نقشه خاک استفاده شده است. نقشه برداری خاک در این روش به طور کامل براساس ویژگی های خاک صورت گرفته است. همان طور که گفته شد در نقشه برداری های مرسوم خاک ویژگی های زیرسطحی خاک کم تر مورد توجه قرار می گیرد. بنابراین اگرچه ویژگی های خاک همواره در نقشه برداری خاک مورد استفاده قرار گرفته است، اما هدف از این مطالعه تأکید بر ویژگی های افق ها و خصوصیات مشخصه خاک به ویژه ویژگی های زیرسطحی خاک و نشان دادن امکان استفاده از این ویژگی ها به منظور تفکیک بهتر واحدهای نقشه و تولید نقشه تفصیلی خاک است.

ظرفیت های محاسباتی (۸) و مقرون به صرفه بودن این روش های استفاده از اطلاعات سنجش از دور (۱۵) به طور فزاینده ای به طرف روش های کسب اطلاعات خاک از روش غیرمستقیم سوق پیدا کرده است (۴۰). تئوری این روش نیز همانند روش مرسوم روابط خاک- محیط است (۱، ۸) اما محصول نهایی آن بیان کمی تغییرپذیری خاک به همراه اندازه گیری سطوح دقت است. پایه و اساس روش نقشه برداری جدید معادله SCORPAN است. در این معادله کلاس یا خصوصیات خاک به هفت متغیر کمکی شامل ویژگی های خاک (S)، اقلیم (C)، ارگانیزم ها (O)، توپوگرافی (R)، مواد مادری (P)، سن (A) و موقعیت مکانی (N) ارتباط داده می شود (۲۵). در نقشه برداری رقومی برقراری روابط بین کلاس/ ویژگی خاک و متغیرهای محیطی با تکنیک های مختلف از جمله ماشین یادگیری (مانند منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی، درخت تصمیم و ...) جایگزین شده است (۱۱، ۱۷، ۲۶، ۲۷). باین حال محصولات نهایی نقشه برداری رقومی نمایش ساده شده ای از الگوهای نامشخص و پیچیده تغییرات خاک است (۴۰). هم چنین نقشه های تولیدی به دلیل اتکای زیاد این روش ها به داده های سنجش از دور، مدل رقومی ارتفاع و کاربری اراضی که توجه چندانی به خصوصیات زیرسطحی خاک ندارند، چندان قابل اطمینان نمی باشند. با وجود اهمیت استفاده از ویژگی های خاک، بسیاری از مقالاتی که در نقشه برداری خاک منتشر می شوند کلاس های خاک را تنها از خصوصیات قابل دریافت از سنجش از دور و توپوگرافی و مواد مادری به عنوان فاکتورهای کمکی استفاده کرده اند (۴، ۹، ۲۸، ۳۹). این مسأله در حالی است که در مدل اسکورپن (SCORPAN) استفاده از ویژگی های خاک به ویژه در سطوح وسیع و تنوع بالای خاک دشوار است، فاکتور (S) مدل اسکورپن عمدتاً به اطلاعات

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه به مساحت ۱۰۰ هکتار در روستای باندر از توابع بخش کلاردشت شهرستان چالوس در استان مازندران و در محدوده عرض جغرافیایی $36^{\circ} 26' 51/40''$ تا $36^{\circ} 26' 17/3''$ شمالی و طول جغرافیایی $51^{\circ} 18' 86/52''$ تا $51^{\circ} 19' 47/40''$ شرقی واقع شده است؛ روستای باندر قسمتی از منطقه حفاظت شده البرز میانی بوده و از پوشش گیاهی و جانوری متنوعی برخوردار است (شکل ۱). رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار نیوهال^۱ به ترتیب زیریک و ترمیک برآورد گردید. میانگین دمای سالیانه منطقه کلاردشت در یک دوره آماری سیزده ساله (۱۳۸۴-۱۳۷۲)، $15/7$ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه آن $360/7$ میلی‌متر

است. تأثیر جهت شیب در منطقه باعث به وجود آمدن تغییرات مشخص در خرد اقلیم‌ها و پوشش گیاهی گردیده و بنابراین، خاک‌های متنوعی در این وسعت کم به چشم می‌خورد. منطقه مورد مطالعه به دلیل ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر نسبت به اراضی پست مجاور و شیب‌های تند (بیش از ۲۵ درصد) در زمین‌نمای کوهستان قرار گرفته است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ سطح وسیعی از منطقه را توف‌ها، سیلت‌سنگ و سنگ‌های آتشفشانی تفکیک نشده کرتاسه بالایی به خود اختصاص می‌دهد. همچنین، سنگ آهک گلوبوترونکانا و سنگ آهک مارنی در قسمت‌های حاشیه‌ای منطقه و سنگ آهک دولومیتی در قسمت‌های مرکزی منطقه دیده می‌شود.



شکل ۱- موقعیت منطقه در کشور ایران (a) و استان مازندران (b) و تصویر سه‌بعدی منطقه (d) موقعیت خاک‌رخ‌های حفر شده بر روی مدل رقومی ارتفاع (e).

Figure 1. Location of the study area in country (a), province (b), three dimensional view (d) and sample profiles on DEM (e).

معمولی و شاخص، تخمین زده شد. کریگینگ شاخص ضمن آنکه نسبت به داده‌های خارج از ردیف حساس نیست، نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها نیز ندارد. بنابراین در پهنه‌بندی ویژگی‌هایی که از توزیع نرمال برخوردار نبودند از کریگینگ شاخص استفاده شد.

در این مطالعه، نقشه‌برداری خاک به دو روش استفاده از سطوح ژئومورفیک و نیز درون‌یابی عددی ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی خاک در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ صورت گرفت. به‌منظور تهیه این نقشه از نقشه‌های زمین‌ریخت و زمین‌شناسی منطقه استفاده گردید. به‌دلیل تفاوت و تأثیر بسیار قابل‌توجه پوشش گیاهی در تکامل خاک‌های منطقه، از نقشه پوشش گیاهی نیز در تفکیک واحدهای خاک استفاده گردید. با ترسیم مرز واحدهای زمین‌ریخت و تأثیر دادن فاکتورهای زمین‌شناسی، توپوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) و پوشش گیاهی و تلاقی آن‌ها با یکدیگر، واحدهای ژئومورفیک مشخص شدند (۳۲). زمین‌ریخت‌ها با استفاده از عکس‌های هوایی و مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه با دقت ۱۰ متر استخراج گردیدند. توصیف واحدهای ژئومورفیک در این مطالعه بر اساس سیستم آمریکایی^۲ (GDS) صورت گرفت (۳۱). به‌طورکلی در تفکیک واحدهای ژئومورفیک منطقه از مفهوم خاک‌سازی استفاده شد و بر اساس دانش ژئومورفولوژی و شناخت فرآیندهای تکامل، مرز واحدها ترسیم و با ارتباط دادن آن‌ها با تکامل خاک‌ها همراه با تأثیر دادن فاکتورهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و پوشش گیاهی یا کاربری اراضی، سطوح ژئومورفیک یکنواختی ترسیم گردید. در نهایت یکنواختی واحدها با نمونه‌برداری صحرائی و تشریح خاک‌رُخ مورد بررسی و صحت حدود ترسیم‌شده برای واحدها مورد آزمون قرار گرفت.

به‌منظور بررسی تغییرات در فاصله میان خاک‌رُخ‌ها نمونه‌برداری از ۵۶ خاک‌رُخ و ۴۴ مته به‌صورت شبکه‌ای نسبتاً منظم با فواصل ۱۰۰ متر انجام شد. شکل ۱ پراکندگی خاک‌رُخ‌های حفرشده بر روی مدل رقومی ارتفاع منطقه با مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ را نشان می‌دهد. مته‌ها در فواصل ۱۰۰ متری نسبت به خاک‌رُخ‌ها حفر گردیدند. تشریح خاک‌رُخ‌ها بر اساس روش استاندارد ارزیابی خاک‌ها و طبقه‌بندی خاک‌ها مطابق با آخرین کلید سیستم جامع رده‌بندی آمریکایی خاک (۳۶) صورت گرفت. تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی بر روی نمونه‌های برداشت‌شده صورت گرفت. درصد رطوبت اشباع، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (۲۲) بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۴)، کربن آلی به روش والکلی-بلاک، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (۱۹۵۲) و کربنات کلسیم معادل به روش کلسیم‌تری (۶) انجام گردیدند. واکنش خاک، قابلیت هدایت الکتریکی، کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) و آنیون‌های (کلر، کربنات و بی‌کربنات) محلول نیز به روش استاندارد در عصاره اشباع خاک‌ها اندازه‌گیری شدند (۳۸).

برای تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماري از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. به‌منظور بررسی و توصیف ساختار مکانی متغیرهای موردنظر از نیم‌تغییرنما استفاده شد. وجود روند و ناهمسانگردی داده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. پس از تهیه منحنی‌های تغییرنما، انتخاب بهترین مدل‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی مقاطع و نیز شاخص^۱ RMSS انجام گرفت. هرچه مقدار RMSS آن به یک نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل به‌کاررفته بیش‌تر است. درنهایت پس از محاسبه واریوگرام‌های تجربی و برازش مدل‌های مناسب به آن‌ها، مقادیر متغیرهای موردنظر، در نقاط نمونه‌برداری نشده با استفاده از روش‌های کریگینگ

2- Geomorphic Description System

1- Root-Mean-Square in Seconds

زیرگروه‌ها از ویژگی ضخامت خاکرخ استفاده شد. از ویژگی ضخامت افق مالیک برای تفکیک مالی سول‌ها از سایر خاک‌ها استفاده گردید. این معیار نه تنها مالی سول‌ها را از سایر خاک‌ها تفکیک می‌کند بلکه زیرگروه‌های پیچیک^۱ مالی سول را نیز از سایر زیرگروه‌ها جدا می‌کند. از آنجایی که تنها در انتی سول‌ها امکان وجود افق کمبیک وجود ندارد، بنابراین از مرز فوقانی افق کمبیک برای تفکیک انتی سول‌ها از اینسپتی سول استفاده شد. هم‌چنین از مرز فوقانی افق آرچیلیدک برای تفکیک آلفی سول‌ها و نیز گروه بزرگ Argixerolls استفاده گردید. به دلیل نقش مؤثر افق کلسیک در تفکیک گروه‌های بزرگ و زیرگروه‌های خاک‌های منطقه، مرز فوقانی افق کلسیک نیز به منظور بهبود موقعیت مرز بین واحدهای خاک به کار برده شد. برای افزایش دقت تفکیک واحدها از نقشه موضوعی جوشش با اسید نیز استفاده گردید. از این ویژگی برای تفکیک کلاس‌های آهکی فامیل خاک استفاده شد.

بنابراین نقشه‌های موضوعی مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS (9.3) تهیه گردید. به منظور تفکیک بهتر خاک‌ها، الگوهای توزیع مکانی هر ویژگی به شکل خطوطی که شرایط مرزی را مشخص می‌کنند نمایش داده شد. به بیان دیگر، نقشه‌ها ساده شد و تنها مرزهای بین خاک‌ها با مقادیر مختلف از ویژگی انتخابی باقی ماند. نقشه‌ها موضوعی به دست آمده در محیط GIS با یکدیگر ادغام شده و نقشه نهایی منطقه به دست آمد.

نتایج و بحث

چهار رده خاک شامل انتی سولز، اینسپتی سولز، مالی سولز و آلفی سولز مشتمل بر چهار تحت رده

ویژگی خاص این روش استفاده از درون‌یابی ویژگی‌های زیرسطحی است که در رده‌بندی خاک به‌عنوان ویژگی‌های مشخصه قلمداد می‌گردند. از ویژگی‌هایی مانند ضخامت افق‌ها، عمق مرز بالایی یا پایینی افق‌های مشخصه و شاخص‌هایی که نشان‌دهنده وجود یک پدیده مشخص و یا درجه ظهور ویژگی‌های مشخصه در خاک می‌باشند و هم‌چنین نسبت بین این مقادیر می‌توان به منظور ترسیم مرز بین واحدهای خاک استفاده کرد. در این مطالعه انتخاب ویژگی‌های مشخصه بر اساس کلاس‌های خاک موجود در منطقه و سیستم طبقه‌بندی مورداستفاده صورت گرفت. تأثیرگذارترین ویژگی‌ها در تفکیک خاک‌های مختلف به‌عنوان ویژگی مشخصه در نظر گرفته شدند. به‌عنوان مثال آنچه باعث تفکیک مالی سول‌ها از سایر خاک‌ها می‌گردد حضور افق مالیک می‌باشد. در میان مالی سول‌های منطقه نیز مهم‌ترین ویژگی‌هایی که باعث تفکیک آن‌ها از یکدیگر می‌گردد عمق خاک، ضخامت افق مالیک، حضور یا عدم حضور افق کلسیک، و جوشش با اسید می‌باشد. بنابراین، با توجه به رده‌های خاک موجود در منطقه (انتی سولز، اینسپتی سولز، مالی سولز و آلفی سولز) و ویژگی‌های استفاده شده در تفکیک خاک‌ها در سطوح پایین‌تر، از مرز فوقانی افق کمبیک، مرز فوقانی افق آرچیلیدک، مرز فوقانی افق کلسیک، ضخامت افق مالیک، ضخامت خاکرخ و آهکی یا غیرآهکی بودن در تفکیک خاک‌ها استفاده شد. برای درون‌یابی ویژگی‌های انتخابی از تخمینگر کریگینگ در محیط GIS استفاده شد. در مورد ویژگی‌هایی که در منطقه از توزیع پیوسته‌ای برخوردار نمی‌باشند، در نقاط فاقد این ویژگی مقدار عددی صفر در نظر گرفته شد (۲۱). به‌عنوان مثال، ضخامت افق مالیک در خاکرخ‌های فاقد این‌پی‌دون صفر منظور گردید. برای تفکیک زیرگروه‌های لیتیک خاک از سایر

1- Pachic

انجام شده درجه تکامل خاک‌های آلفی سول و مالی سول بسیار به هم نزدیک می‌باشد (۳، ۱۳). در این مطالعه آلفی سول‌ها خاک‌ها متکامل‌تر در نظر گرفته شده و ارزش عددی بالاتری به آنها تعلق گرفته است. خاک‌های تکامل یافته‌تر (آلفی سول و مالی سول) در نتیجه میزان رطوبت بیشتر و پوشش گیاهی متراکم‌تر در مناطق کم شیب و جهت‌های شمالی قرار گرفته‌اند. خاک‌های انتی سول نیز عمدتاً در جهت‌های جنوبی با شیب‌های تند، پوشش گیاهی تنک و رطوبت کم‌تر یافت می‌شوند که در این مناطق شرایط لازم برای تشکیل شدن افق‌های مشخصه زیر سطحی وجود ندارد.

اورتنتر^۱، زرالفر^۲، زریپتر^۳ و زرولز^۴، هفت گروه بزرگ، ۱۴ زیر گروه و ۲۶ فامیل خاک در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیکی و شیمیایی یک پروفیل از هر یک از رده‌های خاک شناسایی شده در منطقه به‌عنوان نمونه در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

به منظور پیدا کردن سریع خاک‌ها در واحدهای نقشه خاک، کلاس‌های فامیل خاک‌ها بر اساس میزان تکامل از ۱ (کمترین تکامل) تا ۲۶ (بیشترین تکامل) کدگذاری شدند (جدول ۳). این کدگذاری صرفاً به جهت آشنایی و شناخت بهتر فامیل‌های خاک در نقشه‌های خاک تولیدی می‌باشد. با توجه به مطالعات

جدول ۱- ویژگی‌های مورفولوژیکی پروفیل‌های نماینده به همراه طبقه‌بندی آنها تا سطح فامیل.

Table 1. Morphological characteristics of representative profiles along with their classification up to family.

چشم‌پوشی Effervescence	شکل پذیری Plasticity	چسبندگی Stickiness	مقاومت Consistence		ریشه Roots	خفرات Pores	ساختار Structure	رنگ Color		عمق Depth (cm)	افق Horizon
			مطربر Moist	خشک Dry				مطربر Moist	خشک Dry		
Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Calcixerolls : P-7											
ev	vp	vs	fi	vh	3f	3vf/f	2 m sbk	10YR3/3	10YR4/3	0-10	Ap
ev	vp	vs	fi	eh	3f+2m	3vf/f	3 m sbk	10YR3/3	10RY4/3	10-25	A
ev	vp	vs	fi	eh	3m	3vf/f	2cabk+sbk	10YR3/3	10RY4/3	25-55	Bw
ev	vp	vs	fi	eh	3c	2f	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	55-90	Bk1
ev	vp	vs	fi	eh	1m	2f	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	90-120	Bk2
ev	vp	vs	fr	eh	...	...	2 m pr	10YR4/4	10YR4/4	120-150	Btk1
Loamy-skeletal, mixed, active, calcareous, thermic Lithic Xerorthents : P-13											
ev	p	s	fr	mh	2vf/f	2vf/f	2 m gr	10YR5/4	10YR6/3	0-17	A
ev	p	s	fr	mh	2vf	1vf	2 m sbk	10YR5/4	10YR6/3	17-30	AC
Fine-loamy, mixed, active, thermic Typic Calcixerepts : P-35											
es	p	s	fi	vh	2vf/m	2vf/f	2 f gr	10YR4/4	10YR6/4	0-20	AP
es	p	s	fi	vh	2f/m	2vf	2 m gr/sbk	10YR5/4	10YR6/4	20-35	Bw
ev	p	s	fr	vh	2vf	1vf	2 m sbk	10YR5/6	10YR6/4	35-60	Bk1
ev	p	s	fr	vh	...	...	...	10YR6/4	10YR7/4	60-90	Bk2/C
Fine, mixed, active, thermic Calcic Haploxeralfs : P-80											
ne	vp	vs	fi	eh	2c/vf/f	3vf	2 m sbk	10YR4/4	10YR4/4	0-15	A
ne	vp	vs	fi	eh	2/vf/f	2vf/f	2 m sbk	10YR4/4	10YR5/4	15-35	Bw
es	vp	vs	fi	eh	2vf	2vf/f	2 m sbk	10YR4/4	10YR5/6	35-57	Bt1
ev	p	s	fr	ha	2vf/f	2vf	m	10YR7/4	10YR7/4	57-90	Bk1
ev	p	s	fr	vh	2vf/f	...	m	10YR6/4	10YR7/3	90-120	Bk2

- 1- Orthents
- 2- Xeralfs
- 3- Xerepts
- 4- Xerolls

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پروفیل‌های نماینده به همراه طبقه‌بندی آن‌ها تا سطح فامیل.

Table 2. Physical and chemical properties of representative profiles along with their classification up to family level.

شن	سیلت	رس	کربن آلی	آهک	رطوبت اشباع	سنگریزه	سدیم	پتاسیم	منیزیم	کلسیم	کلر	بی‌کربنات	کربنات	اسیدیته	هدایت الکتریکی	جرم مخصوص ظاهری	افق
Sand	Silt	Clay	OC	CaCO ₃	SP	Gravel	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	pH	dS/m EC	g/cm ³ BD	Horizon
Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Calcixerolls : P-7																	
14	38	48	26.3	7.5	2.65	...	96	37	8.1	9.6	2.1	4.6	0.6	8.19	0.77	1.6	Ap
14	38	48	44.4	1.6	3.75	5.1	69	6	1.2	9.9	3.1	11	0.6	8.14	1.07	1.43	A
12	38	50	1.3	4.8	3.72	1	89	19	5.2	11	2.1	8.1	0	7.77	1.15	1.71	Bw
12	34	54	74	3.11	6.64	9.1	72	9	9.1	3.6	1	5	0	8.07	0.7	1.28	Bk1
12	34	54	39	4.12	2.67	8	83	6	9.1	3.5	2.1	1.3	0	7.96	0.71	1.38	Bk2
18	32	50	35	15	9.63	9.2	57	6	8.1	4	2.1	3	0	8.18	0.54	1.58	Btk1
Loamy-skeletal, mixed, active, calcareous, thermic Lithic Xerorthents : P-13																	
42	38	20	43.1	6.3	7.44	7.4	59	12	1.2	6.6	6.1	7.6	0	8.03	0.75	1.36	A
38	41	21	18.1	6.6	9.43	4.6	55	8	1.2	2.5	4.1	4.5	0	8.25	0.65	...	AC
Fine-loamy, mixed, active, thermic Typic Calcixercepts : P-35																	
39	37	24	28.1	9.1	5.46	10	42	27	2	2.1	4.5	50.6	0.4	8.08	1.12	1.47	AP
39	36	25	1.1	4.7	5.47	4.22	42	7	2.2	9.5	1.4	70.3	0.2	7.93	0.75	1.6	Bw
37	39	24	54	6.15	4.42	6.1	46	4	8.2	2.2	4.2	3	0	8.1	0.47	1.5	Bk1
40	38	22	3	9.18	3.39	4.6	58	6	2	9.1	3.1	70.2	0	8.2	0.38	1.51	Bk2C
Fine, mixed, active, thermic Calcic Haploxeralfs : P-80																	
26	38	36	27.2	7	8.59	6	36	21	4.3	2.1	5.1	2.3	0	7.6	1.24	1.76	A
28	34	38	54	7	7.46	1.1	54	5	6.1	5.5	8.6	7.1	0	7.65	0.81	1.78	Bw
26	32	42	49	1.2	1.52	1.3	55	7	5.2	2.16	1.16	4	0.4	7.93	1.49	1.75	Bt1
22	35	43	42	6.39	2.54	7	37	5	9	1.4	4.3	6.2	0	7.47	0.52	1.94	Bk1
24	33	43	3	9.32	7.54	1.3	38	5	7	7.2	6.1	8.2	0	7.28	0.34	1.65	Bk2

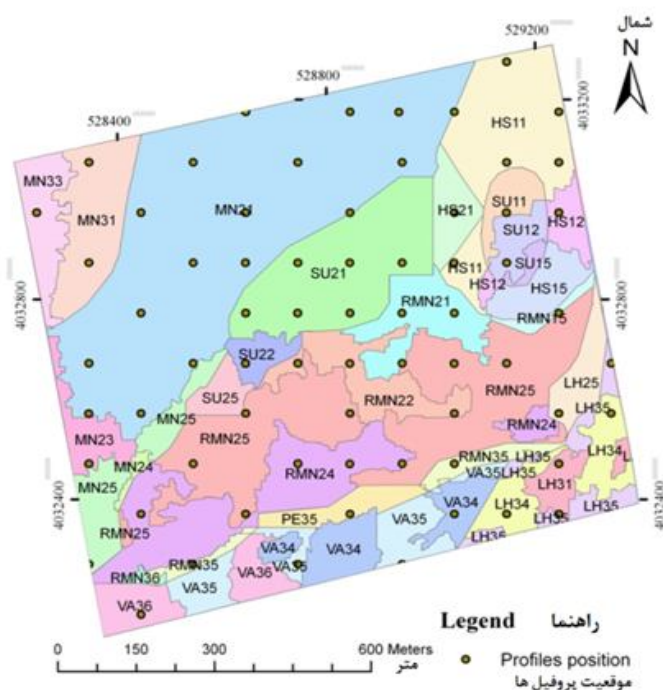
جدول ۳- فامیل‌های خاک شناسایی شده در منطقه به همراه کد مربوط به هر خاک.

Table 3. Soil families identified in the area along with the code for each soil.

کد	فامیل	کد	فامیل
Code	Family	Code	Family
1	Loamy-skeletal, mixed, superactive, calcareous, thermic Lithic Xerorthents	14	ine-loamy, mixed, active, thermic Typic Calcixercepts
2	Loamy-skeletal, mixed, active, nonacid, thermic Lithic Xerorthents	15	Fine, mixed, active, thermic Typic Calcixercepts
3	Loamy, mixed, subactive, calcareous, thermic Lithic Xerorthents	16	Loamy, mixed, active, thermic Lithic Haploxerolls
4	Loamy, mixed, active, nonacid, thermic Lithic Xerorthents	17	Clayey, mixed, active, thermic Lithic Haploxerolls
5	Clayey, mixed, active, calcareous, thermic Lithic Xerorthents	18	Fine-loamy, mixed, active, thermic Typic Haploxerolls
6	Loamy, mixed, superactive, thermic Lithic Haploxerepts	19	Loamy, mixed, superactive, thermic Lithic Calcixerolls
7	Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Lithic Haploxerepts	20	Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Typic Calcixerolls
8	Clayey, mixed, active, thermic Lithic Haploxerepts	21	Fine, mixed, active, thermic Typic Calcixerolls
9	Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Typic Haploxerepts	22	Fine, mixed, superactive, thermic Pachic Calcixerolls
10	Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic Humic Haploxerepts	23	Fine, mixed, superactive, thermic Typic Argixerolls
11	Fine-loamy, mixed, superactive, thermic Humic Haploxerepts	24	Fine-loamy, mixed, active, thermic Typic Haploxeralfs
12	Loamy-skeletal, mixed, semiactive, thermic Typic Calcixercepts	25	Loamy-skeletal, mixed, superactive, thermic Mollic Haploxeralfs
13	Coarse-loamy, mixed, superactive, thermic Typic Calcixercepts	26	Fine, mixed, active, thermic Calcic Haploxeralfs

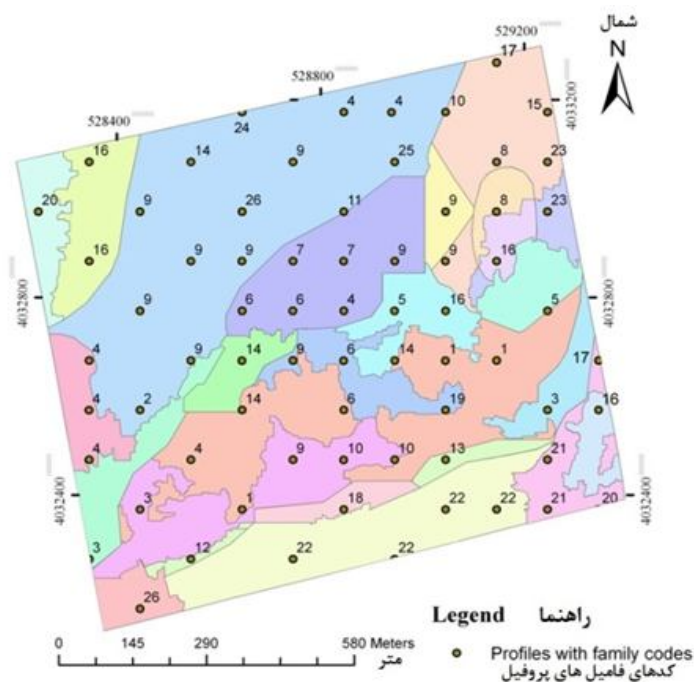
زمین‌شناسی و عدد دوم کد مربوط به پوشش گیاهی در هر یک از واحدها می‌باشد. در تهیه نقشه خاک با استفاده از سطوح ژئومورفیک، ۲۶ واحد خاک از تلفیق لایه اطلاعاتی خاک و نقشه ژئومورفولوژیکی منطقه و همچنین تصحیح مرز واحدهای ترسیم‌شده، به‌دست آمد (شکل ۳). کدهای عددی اختصاص داده‌شده به هر خاکرخ در شکل ۳ نشان‌دهنده کلاس فامیل خاک است (جدول ۳). همان‌طور که در شکل ۳ و جدول ۳ مشاهده می‌گردد از بین ۲۶ واحد تفکیک‌شده، ۲۰ واحد از نوع همسان و ۶ واحد از نوع اجتماع است. بنابراین برخی از مرزهای ترسیم‌شده قادر به تفکیک خاک‌ها حتی در سطح رده هم نبوده‌اند. به‌عنوان مثال واحد نقشه ۱۹ دربرگیرنده ۷ فامیل خاک از سه رده انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز و آلفی‌سولز است.

بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی (GDS) منطقه مورد مطالعه در کلاس ژئومورفیک شیب قرار دارد. این کلاس بیش‌تر به توصیف شکل شیب، هندسه و نحوه قرارگیری عوارض سطح زمین می‌پردازد تا یک فرایند خاص. منطقه مورد مطالعه به‌دلیل ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر نسبت به اراضی پست مجاور و شیب‌های تند (بیش از ۲۵ درصد) در زمین‌نمای کوهستان قرارگرفته است. کوه‌ها در درجه اول توسط فعالیت‌های زمین‌ساختی و یا آتشفشانی و در درجه دوم تحت‌تأثیر فرسایش تشکیل شده‌اند. هفت نوع لند فرم و ۴۱ سطح ژئومورفیک در منطقه تشخیص داده شد (شکل ۲). در راهنمای نقشه ژئومورفولوژی، حروف مخفف کد مربوط به زمین‌ریخت، عدد اول کد مربوط به



شکل ۲- نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه (UTM)، زمین‌ریخت‌ها: {MN، کوهستان}؛ {RMN، شیب کوهستان}؛ {HS، دامنه شیب}؛ {LH، تپه کم ارتفاع}؛ {VA، دره}؛ {SU، قله}؛ {PE، پدیمنت}؛ زمین‌شناسی: {۱: سنگ آهک یا سنگ آهک دولومیتی، ۲: توف‌های کرتاسه تفکیک نشده، لای سنگ و سنگ‌های آتشفشانی، ۳: سنگ‌آهک گلوبوترانکانا، سنگ‌آهک رس‌دار} و پوشش گیاهی: {۱: جنگل، ۲: جنگل کم تراکم، ۳: بوته‌زار، ۴: زراعت رهاشده، ۵: مرتع، ۶: باغ}.

Figure 2. Geomorphological map of the study area (UTM), Landforms: {MN, mountain}; (RMN, mountain slope); (HS, hill slope); (LH, low hill); (VA, Valley); (SU, summit); (PE, Pediment); Geology: {1: limestone or dolomitic limestone, 2: undifferentiated Cretaceous tuffs, siltstones and volcanic rocks, 3: globotrancana limestone, clayey limestone} and vegetation: {1 : Forest, 2: Low density forest, 3: Shrubland, 4: Abandoned agriculture, 5: Pasture, 6: Garden}.



شکل ۳- نقشه خاک منطقه با استفاده از سطوح ژئومورفیک.
 Figure 3. Soil map of the area using geomorphic surfaces.

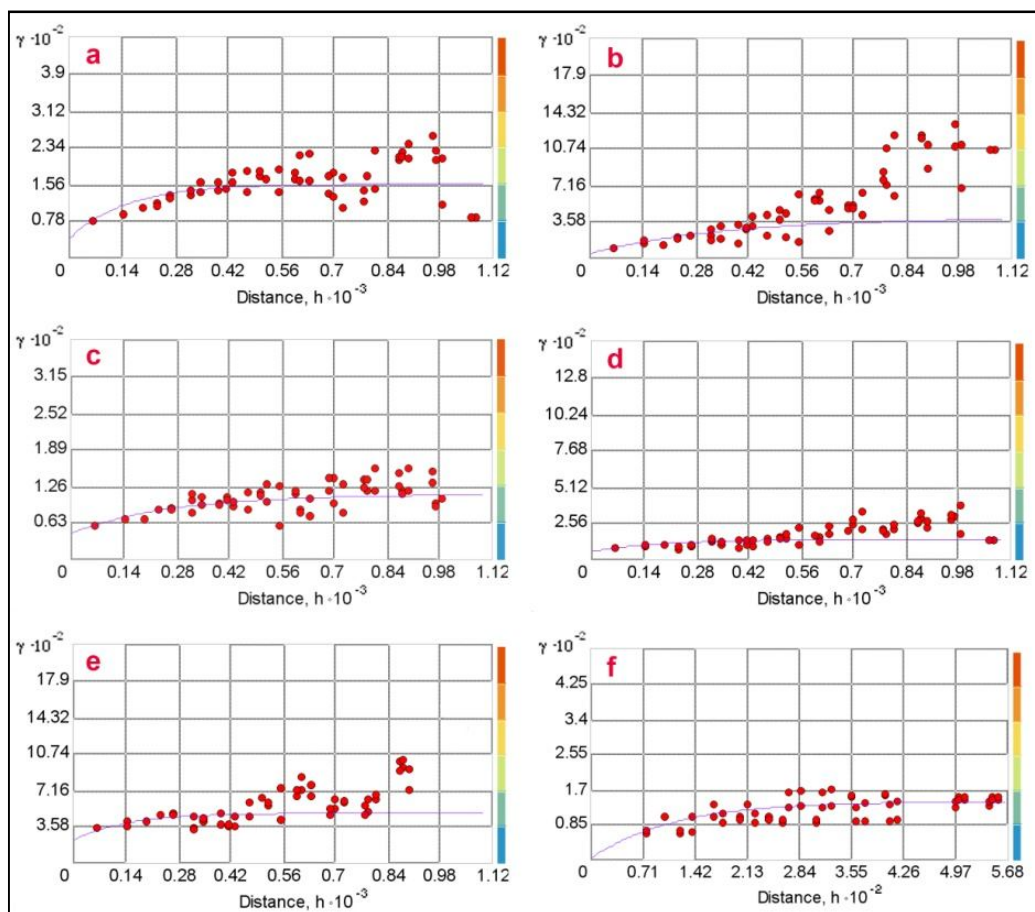
سایر ویژگی‌های مشخصه انتخابی از پیوستگی مکانی متوسطی برخوردار است ($25\% < CO/CO+C < 75\%$). به‌طورکلی پیوستگی مکانی زیاد در خواص خاک را می‌توان به عوامل ذاتی (مانند افزایش رسوبات آهکی) و پیوستگی مکانی ضعیف را به عوامل بیرونی (مانند ذخیره کربن آلی در افق مالیک) ارتباط داد. دامنه (فاصله‌ای که واریوگرام به سقف می‌رسد و بعداً این فاصله‌ها فاقد همبستگی مکانی می‌باشند) یکی دیگر از پارامترهای زمین‌آماری مهم به شمار می‌رود. دامنه منحنی پراش‌نگار به مقیاس اندازه‌گیری و عوامل مؤثر بر تغییرات مکانی خاک بستگی دارد. از دامنه می‌توان به‌عنوان معیاری در انتخاب فواصل نمونه‌برداری در مطالعات بعدی منطقه و یا مناطق مشابه استفاده کرد. دامنه محاسبه‌شده برای ویژگی‌های انتخابی نشان می‌دهند که همبستگی مکانی این ویژگی‌ها بیشتر از فواصل نمونه‌برداری است. بنابراین شبکه نمونه‌برداری طراحی شده قادر به نمایش ساختار فضایی ویژگی‌های انتخابی است.

جدول ۴ مدل‌های برازش داده‌شده به داده‌های عددی ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی انتخابی و شکل ۴ واریوگرام‌های برازش داده شده را نشان می‌دهد. از اعتبارسنجی متقابل برای مقایسه و انتخاب بهترین مدل برازش یافته به داده‌ها استفاده شد. شکل ۵ نتایج اعتبارسنجی متقابل مدل کریگینگ برای ویژگی‌های مشخصه انتخابی را نشان می‌دهد. مدل نمایی بهترین مدل برازش یافته به ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی بود. نتایج مطالعات مختلف نیز نشان داده‌اند که یکی از بهترین مدل‌های برازش داده‌شده به ویژگی‌های خاک مدل نمایی است (۲۰، ۲۴، ۳۰). یکی از شاخص‌های مناسب برای بررسی میزان پیوستگی مکانی متغیر ناحیه‌ای نسبت واریانس قطعه‌ای به سقف ($CO/CO+C$) است (۷). براساس نتایج به‌دست‌آمده ضخامت افق مالیک دارای پیوستگی مکانی قوی ($CO/CO+C < 25\%$) و مرز فوقانی افق کلسیک دارای پیوستگی مکانی ضعیف ($CO/CO+C > 75\%$) است. این در حالی است که

جدول ۴- مدل‌های برازش داده‌شده و پارامترهای مربوط به واریوگرام‌های تجربی متغیرهای موردبررسی.

Table 4. Fitted models and parameters related to the experimental variograms of the studied variables.

RMSS	دامنه (متر) Range (m)	سقف / اثر قطعه‌ای Nugget/Sill	سقف Sill	اثر قطعه‌ای Nugget	مدل Model	متغیر Variable
1.01	1086	0.31	1180.2	373.3	نمایی Exponential	ضخامت خاک Soil Depth
0.93	1086	0.09	358.6	33.3	نمایی Exponential	ضخامت افق مالیک Depth of mollic horizon
0.99	1086	0.63	67.4	42.9	نمایی Exponential	مرز فوقانی افق کمبیک Upper boundary of Cambic horizon
1.10	1086	0.61	18.7	11.6	نمایی Exponential	مرز فوقانی افق آرجیلیک Upper boundary of Argillic horizon
1.01	1086	0.81	265.4	215.9	نمایی Exponential	مرز فوقانی افق کلسیک Upper boundary of Calcic horizon
0.93	335	0.27	0.112	0.031	نمایی Exponential	جوشش

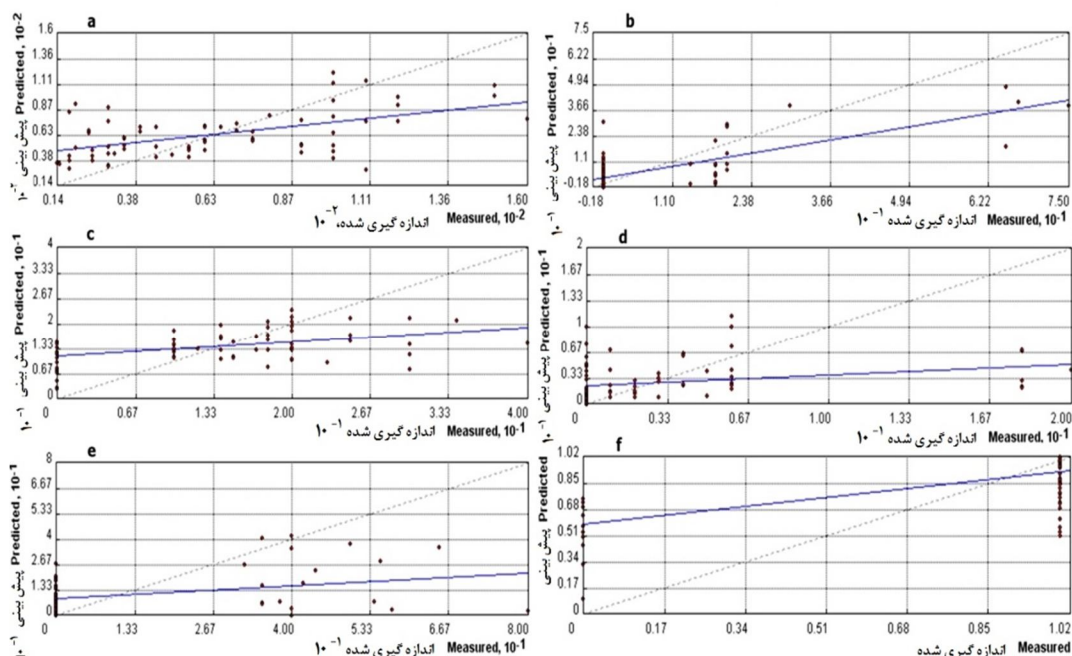


شکل ۴- واریوگرام‌های برازش داده شده به ویژگی‌های مشخصه (a: ضخامت خاک، b: ضخامت افق مالیک، c: مرز فوقانی افق کمبیک، d: مرز فوقانی افق آرجیلیک، e: مرز فوقانی افق کلسیک، f: جوشش با اسید (ne: بدون جوشش، ev: دارای جوشش با اسید)).

Figure 4. Fitted variograms for selective features (a: soil thickness, b: mollic horizon thickness, c: upper cambic horizon boundary, d: upper argillic horizon boundary, e: upper calcic horizon boundary, f: effervescence with acid (ne: no effervescent, ev: extremely effervescent)).

نقشه‌ها ساده شد و تنها مرزهای بین خاک‌ها با مقادیر مختلف از ویژگی انتخابی باقی ماند. در این زمینه از کریگینگ شاخص نیز استفاده شد.

در این مرحله منطقی بود که الگوهای توزیع مکانی هر ویژگی را به شکل خطوطی که شرایط مرزی را مشخص می‌کنند نمایش دهیم. بنابراین

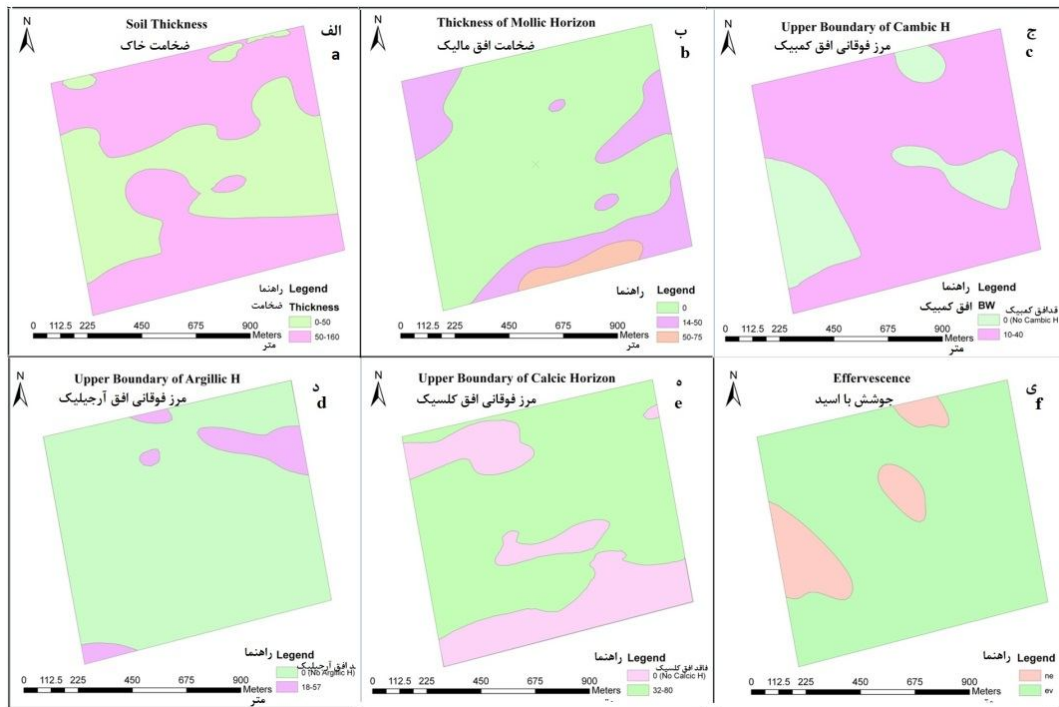


شکل ۵- اعتبارسنجی متقابل مدل کریگینگ برای ویژگی‌های انتخابی (a: ضخامت خاک، b: ضخامت افق مالیک، c: مرز فوقانی افق کمبیک، d: مرز فوقانی افق آرگیلیک، e: مرز فوقانی افق کلسیک، f: جوشش با اسید (ne: بدون جوشش، ev: دارای جوشش با اسید)).

Figure 5. Cross-validation of the Kriging model for selective features (a: soil thickness, b: mollic horizon thickness, c: upper cambic horizon boundary, d: upper argillic horizon boundary, e: upper calcic horizon boundary, f: effervescence with acid (ne: no effervescent, ev: extremely effervescent)).

۱۴ و ۷۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین مرز ترسیم‌شده با خط ۱۴ سانتی‌متر، منجر به تفکیک مالی‌سولز (خاک‌های دارای افق مالیک) از سایر خاک‌ها گردید. از طرف دیگر برخی از مالی‌سولز موجود در منطقه دارای ضخامتی بیش از ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند. بنابراین خط مرزی ۵۰ سانتی‌متر نیز توانست زیرگروه پچیک را از سایر مالی‌سولز تفکیک نماید. از مرز فوقانی افق کمبیک برای تفکیک انتی‌سول‌ها از سایر خاک‌ها استفاده شد. مرز فوقانی افق کمبیک در خاک‌های مطالعه شده بین ۱۰ تا ۴۰ سانتی‌متر متغیر است. بنابراین مرز ترسیم‌شده توسط خط ۱۰ سانتی‌متری می‌تواند انتی‌سول‌ها را از سایر خاک‌های منطقه تفکیک نماید (شکل ۶ ج).

به‌عنوان مثال حداکثر ضخامت خاک‌رخی‌های خاک حفرشده ۱۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین نقشه موضوعی ضخامت خاک (شکل ۶ الف) ساده شد و تنها دو کلاس ۰-۵۰ و ۵۰-۱۶۰ باقی ماند. مرز باقی‌مانده در این نقشه به‌طور مؤثری زیرگروه‌های لیتیک (چهار زیرگروه از ۱۴ زیرگروه) را از سایر خاک‌ها تفکیک می‌کند. ۳۲ خاک‌رخ دارای ضخامت کم‌تر از ۵۰ سانتی‌متر بود و در زیرگروه‌های رده‌های انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز و مالی‌سولز قرار گرفتند. شکل ۶ ب نقشه موضوعی ضخامت افق مالیک را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این مطالعه از خطوط مرزی ۱۴ و ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. حداقل و حداکثر ضخامت افق مالیک شناسایی‌شده در منطقه



شکل ۶- نقشه‌های موضوعی ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی. الف: ضخامت خاک، ب: ضخامت افق مالیک، ج: مرز فوقانی افق کمبیک، د: مرز فوقانی افق آرگیلیک، ه: مرز فوقانی افق کلسیک، ی: جوشش با اسید (ne: بدون جوشش، ev: دارای جوشش با اسید).

Figure 6. Subject maps of subsurface characteristic features. A: Thickness of soil, B: Thickness of Malic horizon, C: Upper boundary of Cambic horizon, D: Upper boundary of argillic horizon, E: Upper boundary of calcic horizon, Y: Effervescence with acid (ne: No boiling, ev: Welding with acid).

موقعیت مرز بین واحدهای خاک استفاده گردید. مرز فوقانی افق‌های کلسیک شناسایی شده در منطقه بین ۳۲ تا ۸۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. خط مرزی که بتواند خاک‌های دارای افق کلسیک را از سایر خاک‌ها جدا کند می‌تواند در تفکیک واحدها بسیار تأثیرگذار باشد. نقشه موضوعی مرز فوقانی افق کلسیک به‌طور کامل خاک‌های دارای افق کلسیک را تفکیک نکرده و از واقعیت زمینی کمی انحراف داشت. بنابراین از مطالعات صحرائی صورت گرفته برای اصلاح مرزهای ترسیم‌شده استفاده گردید (شکل ۶). برای افزایش دقت تفکیک واحدها از نقشه موضوعی جوشش با اسید نیز استفاده گردید. این ویژگی در تفکیک خاک‌ها در سطح فامیل نقش دارد. شکل ۶ ی نقشه موضوعی جوشش با اسید را نشان می‌دهد. در مرحله نهایی به‌منظور دستیابی به نقشه واحدهای

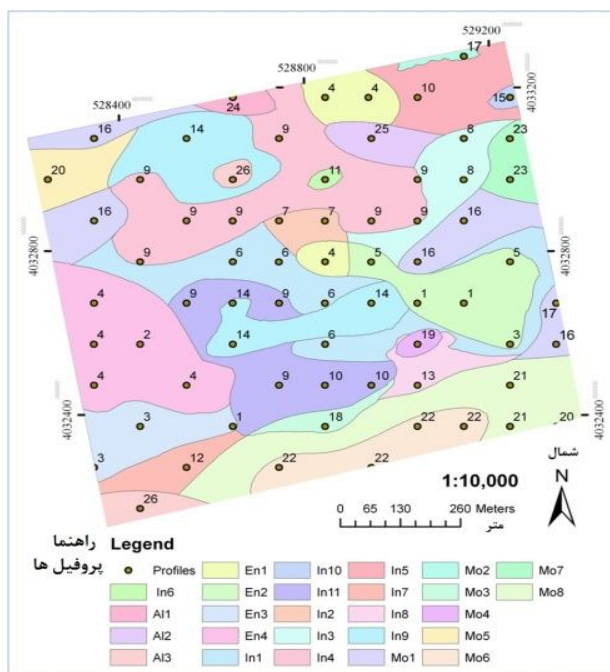
از حضور افق آرگیلیک برای تفکیک آلفی‌سول‌ها و نیز گروه بزرگ آرگی‌زرولز^۱ استفاده گردید. از آن‌جاکه تنها شش خاکرخ از بین خاکرخ‌های حفر شده در منطقه دارای افق آرگیلیک است، نتایج آنالیز زمین‌آماری مرز فوقانی افق آرگیلیک رضایت‌بخش نمی‌باشد. بنابراین از افزایش درصد رس با افزایش عمق به‌منظور تفکیک آلفی‌سول‌ها استفاده گردید. بنابراین خط مرزی ۸ درصدی افزایش رس به‌طور دقیق‌تری خاک‌های دارای افق آرگیلیک را از سایر خاک‌ها جدا کرد (شکل ۶ د).

حضور افق کلسیک از جمله ویژگی‌هایی است که در تفکیک گروه‌های بزرگ و زیرگروه‌های خاک‌های منطقه نقش به‌سزایی ایفا می‌کند. بنابراین در این مطالعه از مرز فوقانی افق کلسیک نیز در بهبود

1- Argixerolls

معمولاً نادیده گرفته می‌شود. فاکتور S مدل اسکورپن می‌تواند به‌طور مؤثری دقت نقشه‌های رقومی خاک را افزایش دهد. در بسیاری از مطالعات این فاکتور به اطلاعات به‌دست‌آمده از سنجش‌ازدور محدود شده (۲۵) یا به‌کلی نادیده گرفته شده است. اکثر مقالات منتشر شده در زمینه استفاده از ویژگی‌های خاک در نقشه‌برداری رقومی صرفاً از ویژگی‌های سطحی خاک استفاده کرده‌اند (۵، ۲۳، ۳۵، ۳۷). تنها مقالات کمی وجود دارد که در آنها از ویژگی‌های زیرسطحی برای تفکیک واحدهای خاک استفاده شده است (۲۱).

خاک، نقشه لایه‌ها با ویژگی‌های مختلف در هم ادغام گردید (شکل ۷). کدهای عددی در نقشه تولید شده نشان‌دهنده کلاس فامیل خاک است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، مرزهای ترسیم‌شده توسط این روش توانایی زیادی در تفکیک واحدهای خاک داشته و تمامی واحدهای تفکیک شده از نوع همسان می‌باشد. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده مستقیم از ویژگی‌های درونی می‌تواند به‌طور معنی‌داری دقت نقشه‌های خاک را افزایش دهد. این در حالی است که در نقشه‌برداری رقومی که امروزه به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار دارد، ویژگی‌های زیرسطحی خاک



شکل ۷- نقشه فامیل خاک به‌دست‌آمده از تلفیق نقشه‌های موضوعی مختلف. کد پروفیل‌ها نشان‌دهنده کد فامیل خاک (جدول ۳) است که نشان‌دهنده نوع خاک‌های غالب در هر واحد نقشه می‌باشد.

Figure 7. Soil family map obtained by combining different thematic maps. The profile code indicates the soil family code (Table 3), which indicates the type of dominant soil in each map unit.

هوراسک و همکاران (۲۰۱۸) از پارامترهای محیطی و ژئومورفیک در نقشه‌برداری رقومی کلاس‌های تاکسونومیک خاک استفاده کرده‌اند (۱۹). از آنجاکه اخیراً نقشه‌برداری رقومی خاک از مرحله تحقیقاتی به‌سمت استفاده‌های کاربردی سوق پیدا کرده است

دامیک و همکاران (۲۰۱۸) صرفاً از نقشه‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی به‌عنوان متغیرهای کمکی در تهیه نقشه‌های تفصیلی کلاس‌های خاک استفاده کرده‌اند (۱۰)؛ هم‌چنین، زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۱۷) از ویژگی‌های سرزمین و ژئومورفولوژی و

است. این مطالعه بر اهمیت نقش فاکتور S در مدل SCORPAN تأکید کرده و نشان داد که ویژگی‌های درونی خاک که به‌طور مستقیم در رده‌بندی خاک دخالت دارد، به‌طور مؤثری می‌توانند در تفکیک واحدهای خاک استفاده گردند. اگرچه داده‌های سنجش‌ازدور به سهولت قابل‌دسترس بوده و نقش مهمی در نقشه‌برداری خاک ایفا می‌کنند، با این حال استفاده از آن‌ها بدون توجه به ویژگی‌های درونی خاک نمی‌تواند منجر به تولید نقشه‌های خاک با دقت بالا گردد. این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب مناسب داده‌های کمکی تأثیر بسیار زیادی بر دقت نقشه‌های تولیدی خواهد داشت. بدون شک انجام مطالعات دیگر به‌منظور بررسی توانایی این روش نقشه‌برداری در سطوح ژئومورفیک دیگر، مقیاس‌های متفاوت و تراکم نمونه‌برداری کم‌تر ارزشمند خواهد بود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت علمی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به خاطر تأمین هزینه انجام پژوهش از محل اعتبار ویژه دکتر احمد حیدری کمال تشکر و قدردانی را دارند.

داده‌ها و اطلاعات

اطلاعات ارائه شده در این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم مریم اوسط در گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران (۱۳۹۶) استخراج شده است و در صورت مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار می‌گیرد.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

(۲۶)، کیفیت نقشه‌های تولیدی باید ارتقا پیدا کرده و قابل اطمینان باشد. استفاده از این نقشه‌های موضوعی به عنوان متغیرهای کمکی نقشه‌برداری رقومی خاک قویاً توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

رویکرد پیشنهادی در زمینه توسعه نقشه‌های تفصیلی به‌طور کامل بر مبنای ویژگی‌های ذاتی خاک است. در این روش از ویژگی‌های مشخصه زیرسطحی استفاده شده است. مبنای این روش درون‌یابی عددی ویژگی‌های مشخصه به‌دست آمده از نمونه‌برداری شبکه‌ای خاک است. از فاکتورهای خاک‌سازی تنها به‌منظور بررسی تنوع کلی خاک‌های منطقه در مرحله مطالعات صحرائی استفاده گردید. بنابراین از فاکتورهای خاک‌سازی در ترسیم مرز بین واحدهای خاک استفاده نشده و از این لحاظ روش استفاده‌شده اساساً با سایر روش‌های نقشه‌برداری رایج خاک متفاوت است. این روش دقت بالایی در ترسیم مرز بین واحدهای خاک داشت. تفاوت اصلی این روش با روش‌های سنتی در تولید نقشه‌های تفصیلی خاک، استفاده از درون‌یابی خودکار نظارت‌شده به‌جای درون‌یابی دستی و استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی می‌باشد. بنابراین استفاده از این روش نتایج تکرارپذیری خواهد داشت. اگرچه در حال حاضر کریگینگ یک روش قدیمی به حساب آمده و با تکنیک‌های ماشین یادگیری جایگزین شده است، با این حال مطالعه حاضر نشان می‌دهد که استفاده درست از الگوریتم‌های ساده‌تر می‌تواند نتایج بزرگی به همراه داشته باشد. یکی از مزایای عمده این روش استفاده از ویژگی‌های درونی خاک به‌عنوان متغیر کمکی در کنار سایر فاکتورهای اقلیم، توپوگرافی، موجودات زنده، مواد مادری و زمان

منابع

1. Angelini, M.E., Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., and Morrás, H.J.M. 2016. Mapping the soils of an Argentine Pampas region using structural equation modelling. *Geoderma*. 281: 102-118.
2. Basayigit, L., and Senol, S. 2008. Comparison of soil maps with different scales and details belonging to the same area. *Soil and water res.* 1: 31-39.
3. Brady, N.C., and Weil, R.R. 1999. Chapter 1. The nature and properties of soils. 13th edition. Pp: 1-59.
4. Bui, E.N., Loughhead, A., and Corner, R. 1999. Extracting soil –landscape rules from previous soil surveys. *Australian Journal of Soil Research*. 37: 495-508.
5. Bui, E.N., and Moran, C.J. 2001. Disaggregation of polygons of surficial geology and soil maps using spatial modeling and legacy data. *Geoderma*. 103: 79-94.
6. Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual. NRCS, USDA, Soil survey investigation report. No: 42, Version 4.0, 736p.
7. Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., and Konopka, A.E. 1994. Field-scale variability of soils properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 58: 1501-1511.
8. Camera, C., Zomeni, Z., Noller, J.S., Zissimos, A.M., Christoforou, I.C., and Bruggeman, A. 2017. A high resolution map of soil types and physical properties for Cyprus: A digital soil mapping optimization. *Geoderma*. 286: 35-49.
9. Dobos, E., Micheli, E., Baumgardner, M.F., Biehl, L., and Helt, T. 2000. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma*. 97: 367-391.
10. Dornik, A., Dragut, L., and Urdea, P. 2018. Classification of soil types using geographic-based image analysis and random forests. *Pedosphere*. 28: 913-925.
11. Du, C., Linker, R., and Shaviv, A. 2008. Identification of agricultural soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. *Geoderma*. 143: 85-90.
12. Elnaggar, A.A. 2007. Development of predictive mapping techniques for soil survey and salinity mapping. (Doctoral dissertation, Oregon state University, Corvallis, Oregon), 185p.
13. Gabler, R.E., Petersen, J.F., and Trapasso, L.M. 2006. Soils and soil development. *Essentials of physical geography*, 8th Edition. Pp: 330-360.
14. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis, in: Klute A. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. *Agronomy*. 9: 383-411.
15. Grunwald, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modelling approaches. *Geoderma*. 152: 3-4. 195-207.
16. Häring, T., Dietz, E., Osenstetter, S., Koschitzki, T., and Schröder, B. 2012. Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian forest soils. *Geoderma*. 185-186: 37-47.
17. Hengl, T., Toomanian, N., Reuter, H., and Malakouti, M.J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*. 140: 417-427.
18. Heuvelink, G.B.M., and Webster, R. 2001. Modelling soil variation: past, present and future. *Geoderma*. 100: 269-301.
19. Horáček, M., Samec, P., and Minár, J. 2018. The mapping of soil taxonomic units via fuzzy clustering- A case study from the outer Carpathians, Czechia. *Geoderma*. 326: 111-122.
20. Juan, P., Mateu, J., Jordan, M.M., Mataix-Solera, J., Meléndez-Pastor, I., and Navarro-Pedreno J. 2011. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. *Journal of Geochemical Exploration*, 108: 62-72.
21. Khitrov, N.B. 2012. The development of detailed soil maps on the basis of interpolation of data on soil properties. *Eurasian Soil Science*. 45: 918-928.

22. Kunze, G.W., and Dixon, J.B. 1986. Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. of Agron. Pp: 91-100.
23. Lee, K.S., Lee, G.B., and Tyler, E.J. 1988. Determination of soil characteristics from thematic mapper data of a cropped organic-inorganic soil landscape. Soil Science Society of American Journal. 52: 1100-1104.
24. Liu, X.M., Xu, J.M., Zhang, M.K., Huang, J.H., Shi, J.C., and Yu, X.F. 2004. Application of geostatistics and GIS technique to characterize spatial variabilities of bioavailable micronutrients in paddy soils. Environmental Geology, 46: 189-194.
25. McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. Geoderma. 117: 3-52.
26. Minasny, B., and McBratney, A.B. 2007. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. Geoderma. 142: 285-293.
27. Mirakzahi, Kh., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M.R., and Bameri, A. 2017. Application of random forest method for predicting soil classes in low relief lands (Case study: Hirmand County). J. of Water and Soil Conservation, 24: 1. 67-84.
28. Moran, C.J., and Bui, E. 2002. Spatial data mining for enhanced soil map modeling. International Journal of Geographical Information Science. 16: 533-549.
29. Odgers, N.P., McBratney, A.B., and Minasny, B. 2011. Bottom-up digital soil mapping. I. Soil layer classes. Geoderma. 163: 38-44.
30. Reza, S.K., Nayak, D.C., Chattopadhyay, T., Mukhopadhyay, S., Singh, S.K., and Srinivasan, R. 2016. Spatial distribution of soil physical properties of alluvial soils: a geostatistical approach. Archives of Agronomy and Soil Science. 62: 972-981.
31. Schoeneberger, P.J., and Wysocki, D.A. 2017. Geomorphic Description System, Version 5.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, 208p.
32. Shahriari, A., Khormali, F., Karimi, A.R., Lehdorff, E., and Tazikeh, H. 2015. Palaeopedological study of loess-palaeosol sequences along a climosequence in northern Iran. J. of Water and Soil Conservation, 22: 2. 21-39.
33. Shrestha, D.P., Moonjun, R., and Farshad, A. 2016. Adequacy of soil information resulting from geopedology-based predictive soil mapping for assessing land degradation: Case studies in Thailand, In: Zink, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., and Del Valle, E.F. Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies, Pp: 457-471.
34. Siqueira, D.S., Marques, JrJ., Pereira, G.T., Teixeira, D.B., Vasconcelos, V., Carvalho Junior, O.A., and Martins, E.S. 2015. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. Catena. 135: 149-162.
35. Skidmore, A.K., Watford, F., Luckananurug, P., and Ryan, P.J. 1996. An operational GIS expert system for mapping forest soils. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62: 501-511.
36. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
37. Sommer, M., Wehrhan, M., Zipprich, M., Castell, Z.W., Weller, U., Castell, W., Ehrich, S., Tandler, B., and Selige, T. 2003. Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale. Geoderma. 112: 179-196.
38. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Leppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, G.T., and Summer, M.E. 1996. Method of soil analysis. Soil Science Society of American Journal, Madison, Wisconsin.
39. Thomas, A.L., King, D., Dambrine, E., Couturier, A., and Roque, A. 1999. Predicting soil classes with parameters derived from relief geologic materials in a sandstone region of the Vosges Mountains (Northeastern France). Geoderma. 90: 291-305.

40. Vaysse, K., and Lagacherie, P. 2017. Using quantile regression forest to estimate uncertainty of digital soil mapping products. *Geoderma*. 291: 55-64.
41. Vincent, S., Lamerrier, B., Berthier, L., and Walter, C. 2018. Spatial disaggregation of complex soil map units at the regional scale based on soil-landscape relationships. *Geoderma*, Pp: 130-142.
42. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, Sh., Jafari, A., and Finke, P. 2017. Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region in Iran. *Geomorphology*. 285: 186-204.
43. Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco Verdinelli, G.H.R., and Del Valle, H.F. 2016. *Geopedology, An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 550p.



Using soil properties map in the production of detailed soil maps

M. Osat¹, A. Heidari^{*2} and A. Salami³

¹Assistant Prof. of Horticulture Crop Research Department, Kordestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran,

²Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tehran, Iran,

³M.Sc. Graduate, Dept. of Science and Engineering, University of Tehran, Iran

Received: 07.08.2020; Accepted: 02.22.2021

Abstract

Background and Objectives: Detailed soil maps are an essential tool for achieving sustainable management. Despite advances in digital soil mapping and efforts to produce accurate maps, insufficient reliability of soil maps on many scales remains. Recent studies have focused primarily on remote sensing, which takes into account the characteristics of the subsurface of the soil. This study used a new interpolation method between subsurface characteristics and soil diagnostic properties to increase the accuracy of the prepared maps. In this study, the production of soil maps with two approaches including use of geomorphic surfaces as well as the interpolation of subsurface characteristics of the soil in the Chalous region were examined.

Materials and Methods: The study area with an area of 100 hectares in Bandar village is one of the functions of Kelardasht section of Chalous city in Mazandaran province. The thickness or depth of the upper / lower boundary of characteristic horizons or characteristic soil characteristics was used as a criterion for distinguishing soil map units. According to the Comprehensive American Soil Classification System, there are six influential characteristics in the division of regional soils at the family level (Upper Combine horizon boundary, argillic horizon upper boundary, calcic horizon upper boundary, Malic horizon thickness, limestone or limestone thickness or the numerical interpolation of these features was used to generate thematic maps. The final soil map of the region was obtained by combining these six thematic maps. After mapping each of the soil properties separately, all the prepared maps were crossed and a map of homogeneous units was obtained. In order to study and describe the spatial structure of the variables, a semivariogram was used. The existence of data trend and heterogeneity was also examined. After preparing the change curves, the selection of the best models was done using cross-validation method and RMSS index.

Results: In order to prepare the soil map using the geomorphic surface method, out of 20 soil units identified, 12 soil units were of the same type and 8 units were of the community type. However, all 20 map units obtained by interpolation of subsurface features were of the same type. This method had high accuracy in drawing the boundary between soil units. The main differences between this method and traditional methods are in the production of detailed soil maps, the use of supervised automatic interpolation instead of manual interpolation, and the use of a set of quantitative indicators.

Conclusion: One of the major advantages of this method is the use of internal characteristics of the soil as an auxiliary variable along with other climatic factors, topography, living organisms, parent material and time. This study underscored the importance of the role of factors in the SCORPAN model and showed that the internal properties of the soil, which are directly involved in soil classification, can be effectively used to separate soil units.

Keywords: Geomorphology, Geostatistics, Soil Map

* Corresponding Author; Email: ahaidari@ut.ac.ir

Arcl