

کاربرد ویژگی‌های ژئومورفومتری در نقشه‌برداری رقومی خاک با استفاده از منطق فازی و یادگیری ماشین

- ❖ اصغر رحمانی؛ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ فریدون سرمدیان*؛ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سید روح‌اله موسوی؛ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سید عرفان خاموشی؛ دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

روش‌های معمول نقشه‌برداری خاک وابسته به نمونه‌برداری متراکم، متأثر از مقیاس و دانش کارشناس می‌باشد، بنابراین استفاده از رویکردهای جدید داده‌کاوی در تهیه نقشه رقومی ویژگی‌های خاک برای مرتفع نمودن مشکلات روش معمول هدف اصلی این تحقیق است. در این پژوهش ۶۲ نمونه خاک از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر براساس روش شبکه منظم (۳۰۰ متر) و نظر کارشناس انتخاب و ویژگی‌های درصد کربن آلی، رس و کربنات کلسیم در بخشی از اراضی دیم منطقه کوهین با مساحت ۳۷۰ هکتار اندازه‌گیری گردیدند. دو دسته داده ۸۰ و ۲۰ درصد به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها انتخاب گردیدند. با استفاده از نرم افزار SAGA GIS و مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، ۱۹ متغیر ژئومورفومتری استخراج و براساس آنالیز تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) سه متغیر ارتفاع، شاخص موقعیت توپوگرافی و شاخص شدت پستی و بلندی و همچنین براساس نظر کارشناس، نقشه واحدهای لندفرم برای مدل‌سازی ویژگی‌ها انتخاب گردیدند. مدل جنگل تصادفی دارای دقت بالاتری بود به نحوی که نتایج آن برای ویژگی‌های درصد کربن آلی، رس و کربنات کلسیم بر اساس آماره‌های ضریب تبیین (R^2) به ترتیب مقادیر ۰/۶۳، ۰/۷۵ و ۰/۶۳ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مقادیر ۰/۱۷، ۰/۷۵، ۵/۷۷ درصد و برای رویکرد SoLIM مقادیر ضریب تبیین (R^2) ۰/۴۷، ۰/۴۲ و ۰/۴۲ و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۲، ۸/۰۸ و ۴/۶۸ درصد حاصل گردید. رویکرد جنگل تصادفی با شناخت ارتباط غیرخطی و بهینه ویژگی‌های خاک و متغیرهای محیطی مؤثر می‌تواند نقشه‌های رقومی را با دقت مناسب برای مدیریت و بهره‌برداری پایدار از اراضی پیش‌بینی نماید.

کلید واژگان: جنگل تصادفی، داده‌کاوی، مدل استنباطی خاک-زمین‌نما، نقشه‌برداری رقومی خاک

۱. مقدمه

در پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک ضروری می‌باشد [۱۷]. ارتباط بین ویژگی‌های خاک و متغیرهای کمکی محیطی یک رابطه خطی، چند جمله‌ای یا حتی بسیار پیچیده‌تر می‌تواند باشد [۳۷]. روش‌های یادگیری ماشین متعددی از قبیل کویست [۳۷]، جنگل تصادفی [۲۲، ۲۷]، رگرسیون درختی [۳۸] و روش‌های یادگیرنده ماشین پشتیبان^۱ [۱۷] به منظور شناخت روابط بین ویژگی‌های خاک و متغیرهای محیطی مورد استفاده واقع شده‌اند. ویژگی عمده مدل‌های فوق این است که آن‌ها از پتانسیل بالایی در ایجاد روابط غیر خطی در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک نسبت به روش‌های رگرسیون خطی برخوردارند. [۱۱] به پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک در کشور آفریقا پرداختند و نتیجه گرفتند که مدل جنگل تصادفی نسبت به روش رگرسیون خطی دارای صحت بیشتری می‌باشد. در مطالعه‌ای توسط [۳۰] با هدف تهیه نقشه برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک از قبیل واکنش خاک، ماده آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی مؤثر، درصد رس و سیلت، سنگریزه و جرم مخصوص ظاهری از پنج روش داده‌کاوی georob, Lasso, geoGAM و BRTs استفاده نمودند و نتایج ایشان نشان داد که مدل جنگل تصادفی نسبت به چهار روش دیگر دارای عملکردی بالاتری می‌باشد. [۴۷] با استفاده از رویکرد تجزیه و تحلیل چند متغیره به بررسی نقش فاکتورهای خاک سازی از جمله پارامترهای ژئومورفومتری و زمین شناسی و لندفرم در توجیه تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک در یک ناحیه نیمه خشک در چهارمحال بختیاری پرداختند. نقش پارامترهای ژئومورفومتری و سنجش از دور در دشت ارومیه برای پیش‌بینی مکانی نقشه رقومی کربن آلی خاک با استفاده از رویکرد یادگیری ماشین تقویت شده مورد بررسی قرار گرفت [۹]. در مطالعه دیگری نیز توسط [۱] نقشه رقومی ذرات معدنی (رس، سیلت و شن) در

پیش‌بینی و بررسی تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک در مدیریت و بهره‌برداری پایدار از اراضی ضروری می‌باشد [۲۶]. در همین راستا وجود اطلاعات با جزئیات و دقت کافی از سیمای اراضی به منظور مدیریت منابع طبیعی، آمایش سرزمین و سایر جنبه‌های مدلسازی‌های محیطی بسیار مهم می‌باشند [۱۷]. ژئومورفولوژی را علم مطالعه ناهمواری‌های سطح اراضی و فرآیندهای که منجر به شکل‌گیری آن‌ها می‌شود تعریف نموده‌اند. پژوهش‌های جدید بر روی فرآیندها، مواد و سن سنجی تمرکز یافته است، اما تمرکز بر ویژگی سطح اراضی هنوز به عنوان بخش مرکزی تعریف ژئومورفولوژی مورد توجه است [۱۵]. بنابراین رشته تخصصی ژئومورفومتری در سال‌های اخیر به دلیل قابلیت دسترسی بیشتر و بهتر به مدل‌های رقومی ارتفاع توسعه ویژه‌ای پیدا نموده است [۱۰]. ژئومورفومتری را علم تحلیل کمی سطح زمین تعریف می‌نمایند که با استفاده از تکنیک‌های ریاضی، آماری و پردازش تصویر به بررسی و کمی‌سازی ویژگی‌های مورفولوژیک، هیدرولوژی، اکولوژی و سایر ویژگی‌های سطح زمین می‌پردازد [۶]. در بیشتر موارد برای شناسایی و جداسازی واحدهای ژئومورفیک از تفسیر بصری عکس‌های هوایی و حضور در منطقه باید بهره‌گیری نمود [۳۶]. آن چه که مسلم است دسترسی سریع و دقیق به ناهمواری‌های موجود در ارتباط با نوع فرآیند غالب از اهمیت زیادی برخوردار است. در این زمینه استفاده از تحلیل‌های کمی مبتنی بر نمایه‌های ژئومورفومتری می‌تواند در بسیاری از مطالعات منابع طبیعی به‌ویژه شناسایی و نقشه‌برداری خاک‌ها مفید واقع گردد [۳۴]. نقشه‌برداری خاک‌ها به روش معمول وابسته به برداشت‌های میدانی بوده و اطلاعات حاصل از تغییرات مکانی آن‌ها، متأثر از مقیاس مطالعاتی می‌باشد [۲۴]. همچنین تهیه نقشه خاک‌ها به‌ویژه در محدوده‌های مطالعاتی وسیع، فعالیتی زمان‌بر و هزینه‌بردار می‌باشد. بنابراین، استفاده از مدل‌های مناسب

^۱Machine learning^۲Support Vector Machine

۲. روش شناسی

۱،۲. معرفی منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری

مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آب کوهین در کیلومتر ۴۰ جاده قزوین-رشت و در بخش کوهین از توابع شهرستان قزوین واقع گردیده است. منطقه مورد مطالعه بر اساس سیستم UTM، زون ۳۹ شمالی، در طول ۳۷۲۹۰۰ تا ۳۷۶۵۰۰ متر و عرض آن از ۴۰۲۴۰۰ تا ۴۰۲۹۰۰ متر متغیر است، مساحت ایستگاه به همراه اراضی مورد مطالعه در مجموع ۳۷۰ هکتار می‌باشد (شکل ۱). بر اساس اطلاعات اقلیمی حاصل از پایگاه هواشناسی واقع در ایستگاه تحقیقاتی، این منطقه دارای متوسط بارندگی سالیانه ۳۳۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، این منطقه دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل و بر اساس محاسبات مدل نیوهال در نرم افزار JNSM دارای رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و مزیک می‌باشد. کاربری اراضی غالب شامل اراضی دیم و باغات الگویی بوده و بر اساس نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، بخشی از زون ساختاری-رسوبی البرز جنوبی و از نظر فیزیوگرافی واحدهای فلات و تراس‌های مرتفع و قدیمی و تپه‌های کم ارتفاع با مواد مادری مارن‌های آهکی به همراه ماسه سنگ، کنگلومرا و آبرفتی مهم‌ترین واحدهای ژئومورفولوژی منطقه را تشکیل می‌دهند. در ابتدا بازدید از منطقه به منظور شناخت کلی از آن صورت گرفت، سپس سطوح مختلف ژئومورفیک مشاهده و چگونگی تغییرات آن‌ها در قسمت‌های مختلف شیب مورد توجه قرار گرفت. در مرحله کار میدانی روش شبکه‌بندی با فواصل ۳۰۰ متر در موقعیت‌های مختلف ناهمواری‌ها رسم شد و خصوصیات منطقه از قبیل جنس سنگ، ارتفاع، شیب، الگوی زهکشی، پستی و بلندی، تندی و شکل شیب مورد مطالعه قرار گرفت. شبکه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار ET GeoWizard انجام پذیرفت. موقعیت ۶۲ نمونه خاک سطحی در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر بر اساس روش نمونه‌برداری شبکه منظم (خارج از ایستگاه) و نظر

اعماق استاندارد بر اساس پروژه جهانی تهیه نقشه خاک با استفاده از توابع عمق و رویکرد جنگل تصادفی در نیجریه مدل‌سازی و پهنه‌بندی نمودند.

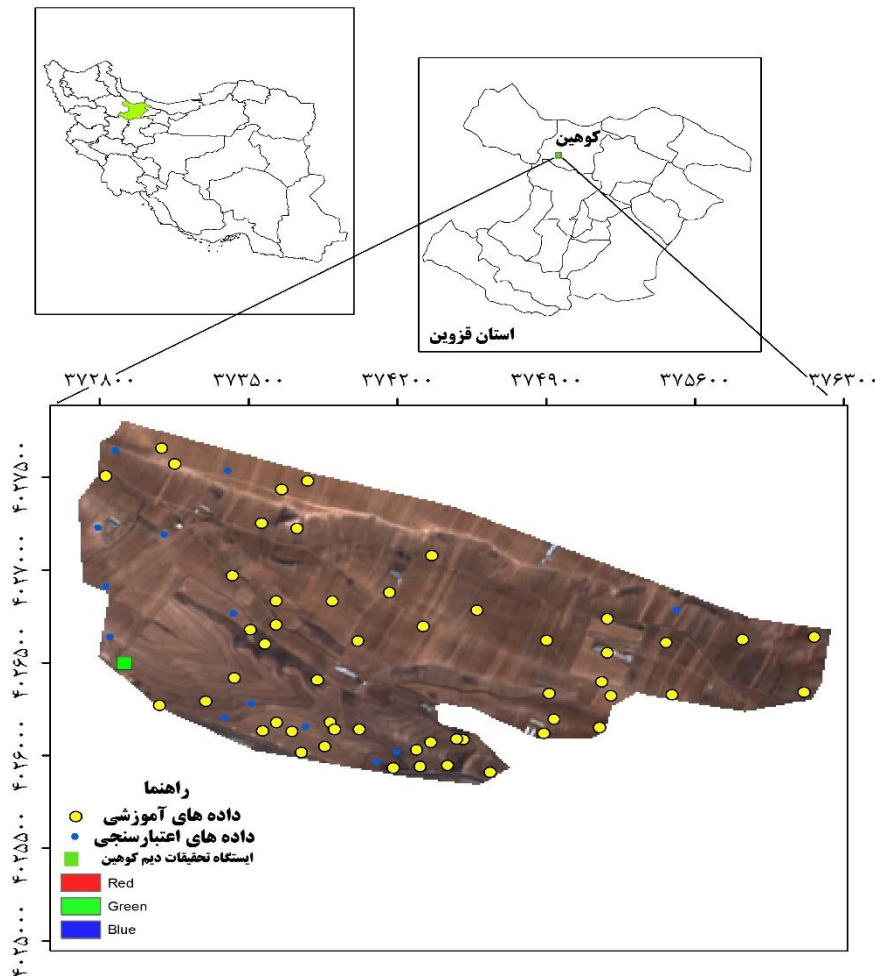
مدل استنباطی خاک-زمین نما و درخت تصمیم با استخراج دانش واضح از طریق قوانین و توابع عضویت فازی به فهم نحوه پیدایش و نقشه‌برداری رقومی خاک‌ها کمک می‌نمایند، از طرفی توابع عضویت فازی، سرشت پیوسته تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک را بهتر نمایش می‌دهند [۴۵]. توابع عضویت فازی به دو صورت قیاسی^۲ (بر اساس دانش کارشناس) و استقرایی (بر اساس داده) طبقه‌بندی می‌گردند [۲۰]. [۲۶] جهت نقشه‌برداری رقومی برخی از ویژگی‌های خاک بر اساس یک مدل دانش محور در دو حوضه آبخیز، بیان نمودند که، استفاده از منطق فازی به‌عنوان یک رویکرد دانش‌محور دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک می‌باشد. همچنین گزارش نمودند که لایه محیطی کاربری اراضی نسبت به سایر متغیرهای کمکی دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. [۴۵] از منحنی‌های پاسخ کلاس‌های خاک نسبت به شرایط محیطی مستخرج شده از مدل جنگل تصادفی به عنوان یک روش داده‌کاوی مؤثر برای تعریف توابع عضویت فازی استفاده نمودند. با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده تاکنون از روش‌های داده‌کاوی و مدل استنباطی خاک-زمین نما به صورت جداگانه برای تهیه نقشه رقومی ویژگی‌های خاک استفاده شده است. بنابراین، مقایسه این دو رویکرد داده‌کاوی برای پیش‌بینی مکانی درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم معادل خاک سطحی با توجه به تأثیرگذاری آن‌ها در حفظ رطوبت، قابلیت دسترسی عناصر غذایی و حاصلخیزی خاک برای افزایش عملکرد محصولات زراعی و باغات دیم و همچنین پوشش طبیعی موجود در اراضی منطقه کوهین قزوین به عنوان هدف اصلی این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

^۱Soil Land Inference Model (SoLIM)

^۲Deductive

و درصد کرین آلی (والکی بلک)، کرینات کلسیم معادل (به روش حجم سنجی) و درصد رس (روش هیدرومتری) بر اساس روش‌های استاندارد در آزمایشگاه خاک‌شناسی اندازه‌گیری گردید.

کارشناس (داخل ایستگاه) به دلیل تغییرپذیری فاکتورهای خاک‌ساز در فاصله کوتاه تعیین و با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی مدل گارمین در سیستم تصویر UTM متریک ثبت و برداشت گردید. پس از حفر پروفیل‌های مورد نظر از افق‌های ژنتیکی آن‌ها، نمونه‌برداری به عمل آمد

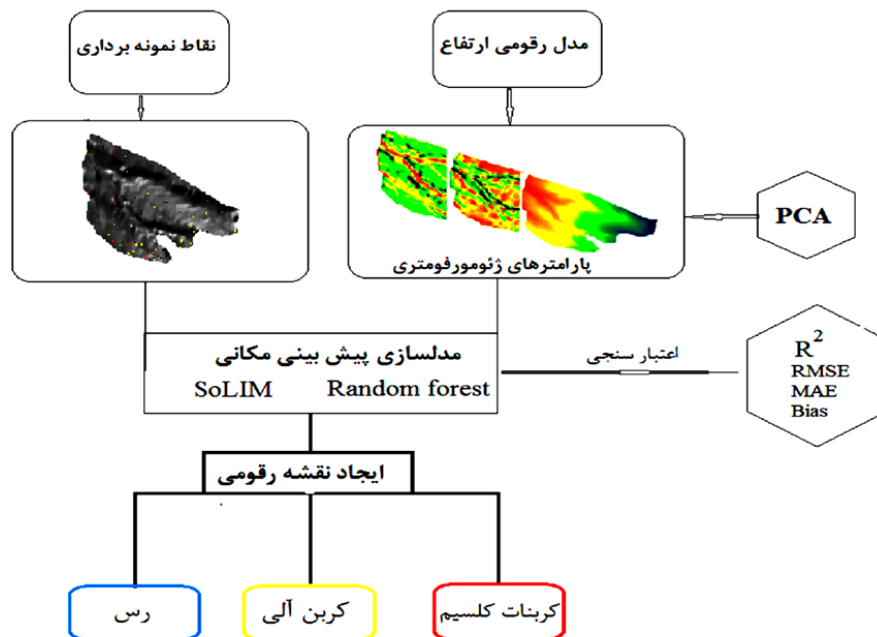


شکل ۱. نقاط مشاهداتی آموزش و آزمون بر روی تصویر رنگی واقعی (باند ۴، ۳، ۲) ماهواره لندست ۸

ژئومورفومتریک بر اساس مدل رقومی ارتفاع، (۳) انتخاب بهینه‌ترین متغیرهای محیطی کمکی با استفاده از آنالیز تجزیه مؤلفه‌های اصلی، (۴) مدل‌سازی مکانی داده‌ها بر اساس دو مدل داده‌کاوی RF و منطق فازی، (۵) تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی بر اساس مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی مکانی و اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی.

۲.۲. روندنمای کلی تحقیق

در شکل (۲) روند نمای کلی اجرای این پژوهش به منظور توصیف فعالیت‌های صورت پذیرفته ارائه شده است. این مراحل به ترتیب شامل موارد زیر می‌باشد: (۱) جمع‌آوری داده‌های خاک از طریق نمونه‌برداری به روش آزاد شناسایی خاک، (۲) تهیه پارامترهای



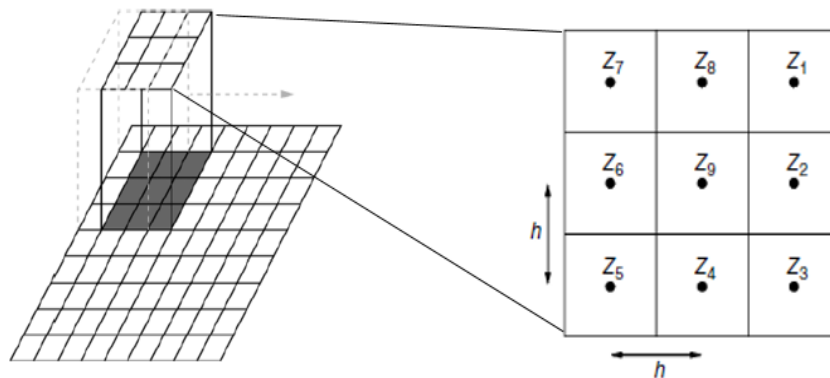
شکل ۲. روند نمای پژوهش حاضر

۳,۲. متغیرهای کمکی ژئومورفومتری^۱

برای استخراج مشتقات اولیه و ثانویه ژئومورفومتری از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه شده از سازمان نقشه برداری کشور استفاده شد، برای تصحیح اولیه خطاهای مدل رقومی ارتفاع از عملیات فیلتر پایین گذر ۳*۳ در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی نسخه ۱۰,۵ و پر کردن عوارض مصنوعی موجود در آن از دستورالعمل موجود (fill sink) در افزونه ArcSIE نسخه ۱۰,۴,۱ استفاده شد. پارامترهای ژئومورفومتری شامل مساحت زهکشی، فاصله تا شبکه آبراهه‌ها، ارتفاع از سطح شبکه آبراهه‌ها^۲، فاکتور طول در شیب، ارتفاع، تابش پخشیده، تابش مستقیم، مساحت حقیقی تجمعی^۳، شاخص همواره دره با قدرت تفکیک مکانی بالا، شاخص همواری قله با قدرت تفکیک مکانی بالا، موقعیت نسبی شیب، ارتفاع نرمال شده^۴، شاخص خیزی ساگا^۵، درصد شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص موقعیت توپوگرافیکی^۶، شاخص زبری پستی و بلندی، عمق دره، شاخص در معرض باد قرارگرفتن [۳۱] با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تصحیح شده در نرم افزار

^۱Geomorphometric covariates^۲Channel network base level^۳Modified catchment area^۴Normalized Height^۵SAGA Wetness index^۶Topographic slope position^۷Data reduction

نشان دهنده مکان‌های با ارتفاع پایین‌تر از متوسط پنجره محل (دره‌ها)^۱ و مقادیر نزدیک صفر نواحی صاف را نشان می‌دهند (شیب نزدیک صفر) یا نواحی شیب ثابت (جایی که شیب نقطه به طور معنی‌دار بزرگتر از صفر باشد ولی شیب ثابت است. مقادیر مثبت خیلی بالا به قله‌ها و یال‌ها مربوط می‌گردد [۴۱]. با استفاده از TPI در مقیاس همسایگی کوچک (۱۰۰ متری) و بزرگ (۱۰۰۰ متری) همراه با شیب می‌توان سیمای سرزمین را در دو کاتگوری موقعیت شیب (بالای یال، عمق دره، میانه شیب) و ناهمواری‌های (دره‌های پر شیب تنگ، دره‌های ملایم، دشت‌ها، شیب‌های باز و مسا) طبقه‌بندی نمود. مبنای محاسبه پارامترهای مورد استفاده، یک پنجره شبکه‌ای ۳*۳ بر روی مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری و بر اساس فرمول‌های زیر می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳. پنجره متحرک ۳*۳ برای محاسبه پارامترهای اولیه و ثانویه از مدل رقومی ارتفاع [۴۴]

موقعیت نسبی شیب: بیانگر موقعیت یک نقطه نسبت به تیغه‌ها و دره یک شیب می‌باشد با مقدار صفر برای کف دره و یک برای بالای تیغه [۱۸].

$$\text{Relative slope position} = \frac{Z_s - Z_y}{Z_x - Z_y}$$

Zs: ارتفاع و Zx: ارتفاع دره و Zy: ارتفاع تیغه می‌باشد. عمق دره: به صورت اختلاف ارتفاع نسبی به خطوط کانال‌های زهکشی همسایگی (متر) [۱۸].

تعداد هشت نوع لندفرم بر اساس TPI یا شاخص موقعیت توپوگرافی شناسایی شد (جدول ۲ و شکل ۴). به منظور فهم بهتر لندفرم‌های طبقه‌بندی شده ابتدا در مورد TPI توضیح داده خواهد شد. شاخص موقعیت توپوگرافی بر اساس مقایسه ارتفاع هر سلول مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه تعریف می‌گردد. اختلاف میانگین ارتفاع محلی از مقادیر ارتفاع در مرکز پنجره محلی مورد استفاده، محاسبه می‌گردد (معادله ۱).

$$TPI_i = Z_i - \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} \quad (1)$$

در معادله بالا Z0: ارتفاع نقطه مورد نظر، Zn: ارتفاع شبکه داخل پنجره محلی، n: تعداد کل نقاط همسایگی. مقادیر مثبت TPI نشان دهنده مکان‌هایی که ارتفاع آن بالاتر از متوسط پنجره محلی است (یال‌ها)، مقادیر منفی

مشتقات اول و دوم سطح مدل رقومی ارتفاع، شدت تغییرات ارتفاع را در پاسخ به تغییرات محلی اندازه‌گیری بر اساس فرمول‌های زیر محاسبه می‌نمایند (شامل x, y) [۴۴].

$$Z_x = dz/dx = (Z_2 - Z_6)/2h$$

$$Z_y = dz/dy = (Z_8 - Z_4)/2h$$

$$Z_{xx} = d^2z/dx^2 = (Z_2 - 2Z_9 + Z_6)/h^2$$

$$Z_{yy} = d^2z/dy^2 = (Z_8 - 2Z_9 + Z_4)/h^2$$

$$Z_{xy} = d^2z/dxdy = (-Z_7 + Z_1 + Z_5 - Z_3)/4h^2$$

$$P = Z^2_x + Z^2_y$$

$$q = p + 1$$

¹Valley

ارتفاع استاندارد: که به صورت حاصلضرب ارتفاع نرمال شده در ارتفاع مطلق تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Standard height} &= \text{Normal height} \\ & * [(Zs - Zmin) - Zmin] \end{aligned}$$

Zs ارتفاع و Zmin حداقل ارتفاع کل منطقه [۱۸].

$$\text{Valley depth} = Zs - Zx$$

Zs ارتفاع و Zx ارتفاع دره.

ارتفاع نرمال: ارتفاع نرمال شده توسط ارتفاع مناطق شیب‌دار^۱ و عمق دره تعریف می‌شود و مقدار آن از ۰ تا ۱ متغیر می‌باشد [۱۸].

$$\begin{aligned} \text{Normal height} &= 0.5 * (1 + \text{slope height} \\ &- \text{valley depth/slope height} \\ &- \text{valley depth}) \end{aligned}$$

جدول ۱. پارامترهای ژئومورفومتری مورد استفاده در مدل‌سازی ویژگی‌های خاک [۱۱].

نوع پارامتر ژئومورفومتری	پارامتر ژئومورفومتری	نماد	فرمول	رفرنس
مقیاس محلی	شاخص همواره دره با قدرت تفکیک مکانی بالا	MrVBF	$MRVBF = W2(1 + VF2) + (1 - W2)VF1$	[۷]
	شاخص همواری قله با قدرت تفکیک مکانی بالا	MrrTF	$N(1 - PCL_{L1}, 0.35, 3)$	[۷]
	ارتفاع	DEM	-	-
	فاکتور طول در شیب	LS Factor	$LS = (M + 1) \left(\frac{CHA}{22.13} \right)^n (\sin B / 0.0896)^2$	[۴۴]
	درصد شیب	%Slope	$\text{Slope gradient} = \sqrt{p}$	[۱۰]
مقیاس سیمای سرزمین	شاخص موقعیت توپوگرافیکی	TPI	$TPI_i = Z_i - \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n}$	[۱۰]
	شاخص زبری پستی و بلندی	TRI	$TRI = \sqrt{(\sum_{i=1}^n Xi)^2 + (\sum_{i=1}^n Yi)^2 + (\sum_{i=1}^n Zi)^2} / n$	[۴۴]
	ارتفاع استاندارد شده	Stn_heigh	$\text{Standard height} = \text{Normal height} * [(Zs - Zmin) - Zmin]$	[۱۸]
	عمق دره	Vallry_depth	$\text{Valley depth} = Zs - Zx$	[۱۸]
مقیاس سیمای سرزمین	ارتفاع از سطح شبکه آبراه‌ها	CBLE	$Zc = Z0 - \bar{z}\lambda + \bar{z}\lambda *$	[۱۸]
	فاصله تا شبکه آبراه‌ها	DFDN	-	[۱۸]
	موقعیت نسبی شیب	RSP	$\text{Relative slope position} = \frac{Zs - Zy}{Zx - Zy}$	[۱۸]
ویژگی‌های هیدرولوژیکی	مساحت زهکشی	CHA	$\text{Catchment area} = \text{VolQdirec} / \text{Peff}$	[۱۰]
	مساحت حوضه زهکشی اصلاح شده	MCHA	-	[۱۰]
	شاخص خیسی ساگا	SWI	$\text{Topographic Wetness index} = \ln(\text{Catchment area} / \tan \text{slope})$	[۱۰]
	شاخص قدرت جریان	SPI	$\text{Catchment area} \times \tan \text{slope}$	[۱۰]
شاخص‌های اقلیمی	تابش مستقیم	DIRE INS	$Ss = \sin \theta * Sc * \tau$	[۱۰]
	تابش پخشیده	DIFF INS	$Sh = 0.5 * \sin \theta * Sc * c * (1 - \tau)$	[۱۰]
	شاخص در معرض باد قرار گرفتن	Wi Ex	$\cos \gamma \omega = \sin \theta * \cos \beta + \cos \theta * \sin \beta * \cos \alpha$	[۱۰]

^۱Slope height

جدول ۲. تشریح واحدهای اجزاء لندفرم در منطقه مورد مطالعه [۴۲]

مقدار TPI (مقیاس بزرگ با همسایگی ۱۰۰۰ متر)	مقدار TPI (مقیاس کوچک با همسایگی ۱۰۰ متر)	توصیف واحد لندفرم	معادل فارسی	کد	واحد لندفرم
TPI=<-1	TPI=<-1	مناطق با خطوط آبراه‌های	آبراهه	۱	streams
-۱<TPI<1	TPI=<-1	زهکشی که در بالای یک دره یا پایین یک قله قرار نگرفته باشد	زهکش شیب میانی، دره‌های کم عمق	۲	Midslope drainages, shallow valley
TPI=>1	TPI=<-1	زهکشی که در مناطق بالادستی یک دره قرار دارد	زهکش مناطق بالایی	۳	Upland drainages, head water
TPI=<-1	-۱<TPI<1	فرورفتگی میان دو کوه گفته می‌شود که در یک جهت گسترش یافته است	دره	۴	valleys
-۱<TPI<1, Slope =<=5°	-۱<TPI<1, Slope =<=5°	مناطق هموار با شیب بسیار پایین	دشت	۵	plains
-۱<TPI<1, Slope>5	-۱<TPI<1, Slope>5	لندفرمی که در پایین یک قله یا منطقه هموار یا بالای دره قرار دارد	شیب باز	۶	Open slope
TPI=>1	-۱<TPI<1	لندفرمی در پایین یک قله یا منطقه هموار باشد و در بالای دره نباشد	شیب بالایی	۷	Upper slope
TPI=<-1	TPI=>1	قله‌های باریک و طول قله بزرگ‌تر از پهنای لندفرم	یال‌های محلی	۸	Local ridges, hill in valley
-۱<TPI<1	TPI=>1	لندفرم‌هایی در شیب میانی با قله‌های باریک و طول قله بزرگ‌تر از پهنای لندفرم	یال‌های شیب میانی	۹	Midslope ridges, small hill in plain
TPI=>1	TPI=>1	لندفرم‌هایی با ارتفاع زیاد و قله‌های باریک و طول قله بزرگ‌تر از پهنای لندفرم	یال‌های مرتفع	۱۰	High ridges, mountain top

پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک از رویکرد داده‌کاوی جنگل تصادفی از بسته "random forest" در نرم افزار Rstudio نسخه ۱،۰،۱۳۱ به ترتیب برای ویژگی‌های درصد کربن آلی، رس و کربنات کلسیم معادل با تعداد درخت (n) ۶۰۰، ۷۰۰، ۶۰۰ و تعداد چهار متغیر محیطی (mtry) به کار گرفته شد و برای آنالیز اهمیت اهم متغیرهای محیطی با توجه به شاخص درصد افزایش میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (InMSE%) از تابع "var Important" در بسته "random forest" استفاده

n: اندازه نمونه (تعداد سلول‌های پنجره متحرک) Xi, Yi, Zi از درصد شیب و جهت شیب محاسبه می‌شوند.

$$Xi = \sin(\text{slope}) * \cos(\text{aspect})$$

$$Yi = \sin(\text{slope}) * \sin(\text{aspect})$$

$$Zi = \cos(\text{aspect})$$

VolQdirect: حجم کل دبی مستقیم حوزه (m³)، Peff: بارندگی موثر (m³/m²)

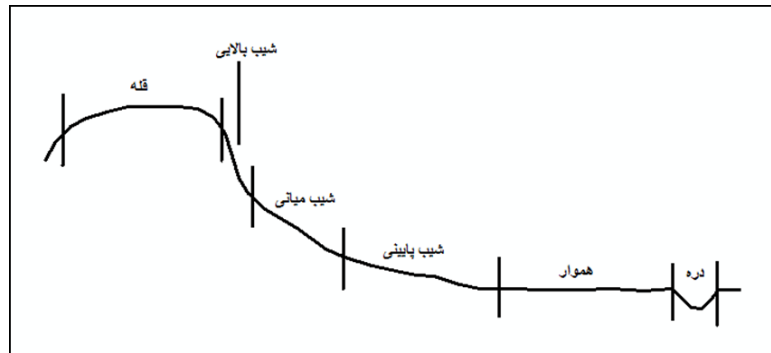
۴،۲. مدل‌سازی مکانی

بعد از تعیین پارامترهای ژئومورفومتری مناسب با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی، برای مدل‌سازی

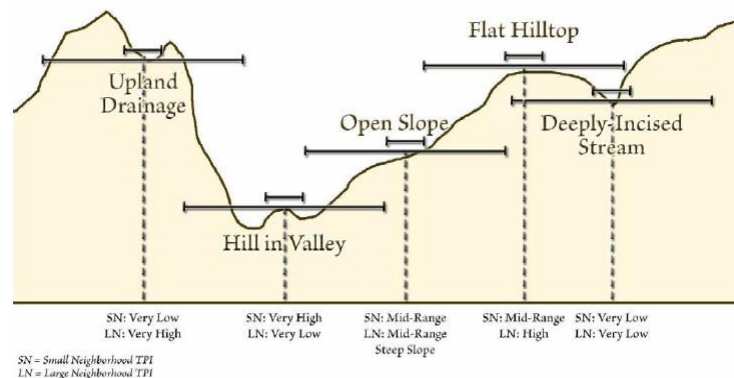
Relative important

حدافل تعداد مشاهدات لازم برای قرارگیری در گره انتهایی درختان (nodesize) که در مطالعات مختلف تعداد این ورودی بسته به تعداد مشاهدات، لایه‌های محیطی متغیر می‌باشد.

شد. در مدل‌سازی به روش جنگل تصادفی پارامترهای لازم برای آموزش مناسب مدل شامل: درخت درختان (ntree) مورد نیاز برای رشد در الگوی جنگل، تعداد متغیرهای پیش‌بینی کننده محیطی در هر گره (mtry) و



Landform Classification, using Large and Small Neighborhood TPI



شکل ۴. شماتیک اجزاء ناهمواری‌ها در مقیاس‌های متفاوت [۴۲]

متغیرها با تعداد درخت بیشتر حاصل می‌گردد. داده‌های آموزش که از نمونه‌های بوت استرپ استخراج شده‌اند (داده‌های خارج از سبد (OOB)) برای تخمین خطای پیش‌بینی و اهمیت متغیر استفاده می‌شوند. در برآورد خطا، نمونه‌های OOB توسط درختان مربوطه پیش‌بینی شده و با تجمع پیش‌بینی‌ها، میانگین (MSE_{OOB}) با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌گردد.

$$MSE_{OOB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_{iOOB})^2 \quad (2)$$

در معادله فوق \hat{y}_{iOOB} پیش‌بینی‌های خارج از سبد

پارامترهای لازم برای آموزش مناسب مدل شامل: درخت درختان (ntree) مورد نیاز برای رشد در الگوی جنگل، تعداد متغیرهای پیش‌بینی کننده محیطی در هر گره (mtry) و حدافل تعداد مشاهدات لازم برای مطالعات مختلف تعداد این ورودی بسته به تعداد مشاهدات، لایه‌های محیطی متغیر می‌باشد. در مطالعات متعددی به ترتیب از ۱۲، ۱۰۰۰ و ۵ عدد استفاده نمودند. پیش‌فرض ntree ۵۰۰ عدد می‌باشد اما پیشنهاد گردیده است که نتایج با ثبات‌تر برای تعیین اهمیت

پیکسل که مورد استنباط واقع می‌شود و مکان نمونه میدانی مورد استفاده یک نوع باشند مقدار تشابه مساوی با ۱ می‌باشد و در غیر این صورت مقدار آن صفر می‌باشد. اگر متغیر محیطی مورد استفاده برای پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک دارای مقیاس فاصله‌ای یا نسبی باشد از فاصله گاورر استفاده می‌شود. در نهایت ویژگی خاک در هر پیکسل با استفاده از تلفیق مقادیر ویژگی‌های خاک در هر نقطه نمونه با استفاده از تشابهات محاسبه شده به صورت یک وزن استفاده می‌گردد [۴۸].

۵.۲. ارزیابی دقت مدل‌سازی

از مجموع تعداد ۶۲ داده مشاهده شده‌ای خاک ۸۰ درصد (۵۰ نمونه) آن‌ها به‌عنوان داده آموزش و ۲۰ درصد (۱۲ نمونه) به‌عنوان داده اعتبار سنجی مدل توسط تکنیک بوتس‌راپتینگ آج‌داسازی گردید. بوتس‌راپتینگ یک روش غیر پارامتریک که بر اساس تکرار متوالی نمونه‌ها و با جایگزینی آن‌ها در بین داده‌های واسنجی اقدام به نمونه‌گیری تصادفی می‌نماید [۱۶]. بوت استرایت یک تکنیک نمونه‌برداری آماری است که این رویکرد مستلزم نمونه‌برداری از مجموعه داده‌ها همراه با جایگزینی می‌باشد [۴۰]. نقاط اندازه‌گیری شده با استفاده از روش نمونه‌برداری بهینه بوت استرایت الگوریتم جنگل تصادفی در نرم‌افزار RStudio 1.0.131 تقسیم گردید. نقشه رقومی پیش‌بینی ویژگی‌های درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم معادل با استفاده از سه آماره ریشه میانگین مربعات خط (RMSE) به‌عنوان یک اندازه‌گیری از صحت مدل و ضریب تبیین R² (نشان‌دهنده درصدی از واریانس داده‌های مشاهداتی توضیح داده شده توسط مدل) و میانگین مطلق خطا (MAE) و میزان اریب بودن (Bias) پیش‌بینی مدل‌ها در نرم‌افزارهای RStudio 1.0.131 با استفاده از بسته "ithir" در SolIM Solution نسخه ۲۰۱۵ با استفاده از روش

داده‌های مشاهداتی، با توجه به اهمیت متغیر، مقادیر یک متغیر پیش‌بینی کننده خاص به طور تصادفی در داده‌های OOB از یک درخت جابجا می‌شوند در حالی که مقادیر سایر پیش‌بینی کننده‌ها ثابت هستند. داده‌های OOB اصلاح شده پیش‌بینی شده بود و تفاوت‌های بین MSE های به دست آمده از داده‌های OOB تغییر یافته و در نهایت یک اندازه‌گیری از اهمیت متغیرها ارائه می‌شود. در رویکرد مدل استنباطی خاک-سیمای سرزمین از پروژه نمونه مدار^۱ نرم افزار SolIM Solutions نسخه ۲۰۱۵ به‌صورتی که در هر پیکسل ۱۰ متری از نقشه‌های عضویت فازی امکان رخداد ویژگی‌های خاک با استفاده از تشابه شرایط محیطی پیکسل‌های نامعلوم به نقاط مورد اندازه‌گیری بر اساس روش ارزش منفرد و تابع فاصله گاورر محاسبه می‌گردد و از تلفیق تشابه‌های محاسبه شده از هر لایه محیطی برای ویژگی‌های خاک با اعمال تابع فاکتور محدود کننده نقشه رستری پراکنش مکانی ویژگی تهیه می‌گردد. هر نمونه میدانی انعکاس‌دهنده رابطه بین خاک و شرایط محیطی نسبی می‌باشد و این رابطه در مکان تکرار می‌گردد و فرض می‌شود که شرایط محیطی مشابه دارای ویژگی‌های خاک مشابه خواهند بود، بنابراین هر نمونه می‌تواند به‌عنوان یک نمونه شاهد در سرتاسر مکان‌های با شرایط محیطی مشابه در نظر گرفته شود و سطح نماینده بودن یک نمونه در یک مکان نمونه‌برداری نشده از طریق تشابه محیطی بین آن‌ها تقریب زده می‌شود. قبل از هر نوع استنباط بایستی تشابه بین هر پیکسل و هر نمونه میدانی در ابتدا برآورد گردد. در محیط نرم افزار SolIM محاسبات تشابه در دو سطح انجام می‌گردد: سطح متغیر و سطح نمونه.

محاسبه تشابه در سطح متغیر: نوع روش‌های محاسبه تشابه در سطح متغیر به نوع متغیر محیطی بستگی دارد.

مقادیر منفرد

اگر متغیر اسمی یا رتبه‌ای باشد از تابع بولین بایستی استفاده گردد. برای مثال تابع بولین برای تعیین تشابه مواد مادری مناسب می‌باشد و اگر مواد مادری یک

^۱Sample-based project

^۲Bootstrapping

۳. نتایج

نتایج خلاصه آماری ویژگی‌های خاک در جدول (۳) نشان داده شده است. کربن آلی خاک از ۰/۱۳ تا ۱/۳۴ درصد با میانگین ۰/۷۶۱ و ضریب تغییرات ۳۴/۴۸ درصد حاصل گردید. ویژگی رس از حداقل ۲۵ تا ۶۰ درصد با میانگین ۱/۷۷ و ضریب تغییرات ۱۹/۴۹ درصد و کربنات کلسیم از حداقل ۸/۰۲ تا ۳۱/۴۲ درصد با میانگین ۷/۸۸ و ضریب تغییرات ۲۸/۵۸ درصد [۴۳] در کلاس تغییرپذیری متوسط (۳۵-۱۵ درصد) قرار می‌گیرند. [۴۹] نیز مقادیر مشابه با این تحقیق در ارتباط با ضریب تغییرات پارامترهای کربن آلی، رس و کربنات کلسیم گزارش نمودند.

اعتبارسنجی ویژگی مورد ارزیابی قرار گرفت (روابط آماری ۱، ۲، ۳ و ۴).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Pi - Oi| \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O}_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - Pi)^2} \quad (3)$$

O_i : مقدار اندازه‌گیری شده P_i : مقدار پیش‌بینی شده
 \bar{O}_i : میانگین اندازه‌گیری شده n : تعداد مشاهدات

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{O}_i - \bar{P}_i) \quad (4)$$

در روابط فوق، n تعداد کل نمونه‌ها، میانگین مقادیر اندازه‌گیری \bar{O}_i و پیش‌بینی شده \bar{P}_i می‌باشند [۲۶].

جدول ۳. خلاصه آماری ویژگی‌های خاک سطحی (۶۲ نمونه)

متغیر	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
رس	۴۱/۷۷	۲۵	۴۲/۵	۶۰	۸/۱۴	۱۹/۴۹
کربنات کلسیم معادل	۱۷/۸۸	۸/۰۲	۱۶/۴۵	۳۱/۴۲	۵/۱۱	۲۸/۵۸
کربن آلی	۰/۸۲	۰/۷۶۱	۰/۱۳	۱/۳۴	۰/۲۷	۳۴/۴۸

میانی شیب با شاخص موقعیت توپوگرافیکی و عدم تغییر مکانی مساحت حوزه زهکشی، از پارامترهای (DEM, TRI, TPI) به همراه نقشه رستری لندفرم برای مدل‌سازی استفاده گردید.

۲.۳. اهمیت نسبی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده محیطی

نتایج آنالیز اهمیت نسبی متغیرهای ژئومورفومتری بر اساس شکل (۶) نشان می‌دهد که به ترتیب ارتفاع، شاخص شدت پستی و بلندی، لندفرم و شاخص موقعیت توپوگرافی بر تغییرپذیری کربن آلی خاک سطحی بیشترین تأثیر را داشته‌اند، ویژگی‌های ژئومورفومتری شاخص شدت پستی و بلندی، ارتفاع، شاخص موقعیت توپوگرافی و لندفرم بر درصد رس خاک سطحی و شاخص

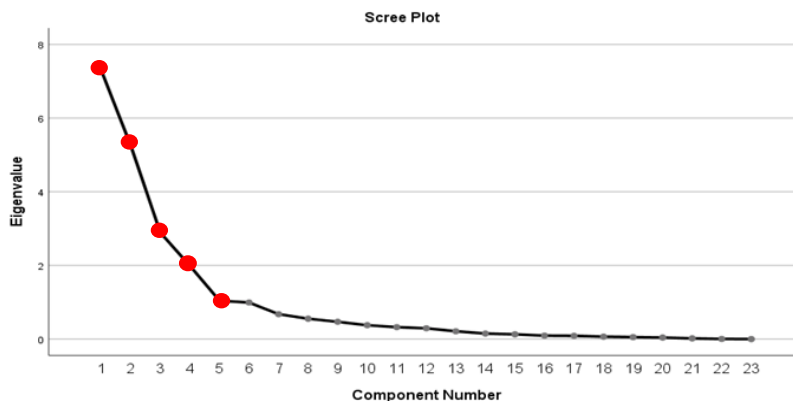
۱.۳. آنالیز مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های ژئومورفومتری

بر اساس مقدار ارزش ویژه بالاتر از یک، ۵ مؤلفه اصلی، ۸۰/۲۶ درصد واریانس موجود در ویژگی‌های ژئومورفومتری را توجیه می‌نمایند (شکل ۵) و (جدول ۴). نتایج همبستگی ویژگی‌های ژئومورفومتری با مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بالای یک نشان داد که در مؤلفه‌های اول تا پنجم، پارامترهای شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص شدت پستی و بلندی، ارتفاع، مساحت حوزه زهکشی و موقعیت میانی شیب به ترتیب بالاترین همبستگی را به خود اختصاص دادند و در نهایت با توجه به نظر کارشناس و به دلیل همبستگی بالای موقعیت

Eigen value

موقعیت توپوگرافی، لندفرم، ارتفاع و شاخص شدت پستی و بلندی در پیش‌بینی کربنات کلسیم معادل به ترتیب از لحاظ تأثیر آن‌ها بر افزایش InMSE % پیش‌بینی مدل جنگل تصادفی، مؤثرترین پارامترها می‌باشند.

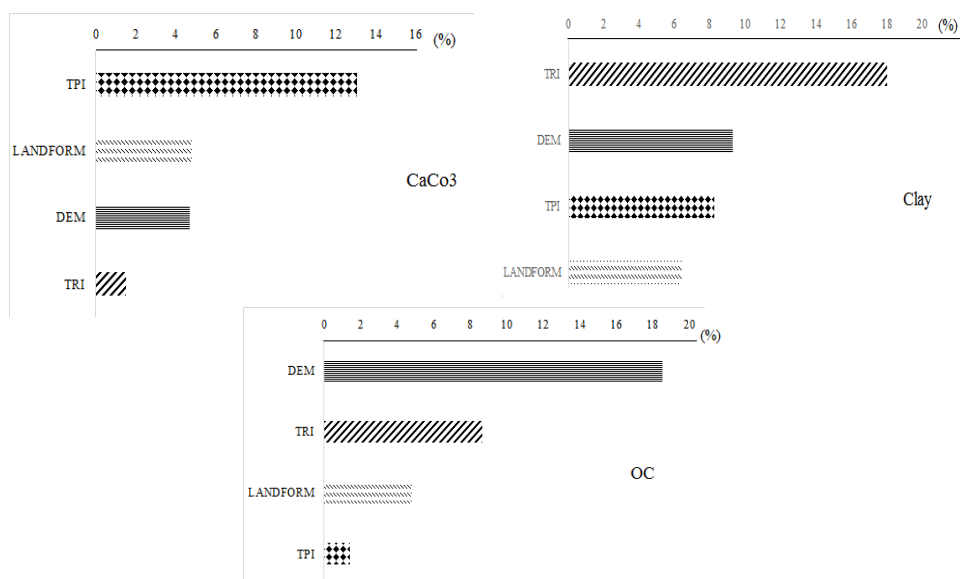
موقعیت توپوگرافی، لندفرم، ارتفاع و شاخص شدت پستی و بلندی در پیش‌بینی کربنات کلسیم معادل به ترتیب از



شکل ۵. نمودار تغییرات ارزش ویژه تجزیه مولفه‌های اصلی

جدول ۴. نتایج واریانس توجیحی تجزیه مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه اصلی	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس
۱	۲۳/۴۵۱	۲۳/۴۵۱
۲	۲۳/۳۲۹	۴۶/۷۸۰
۳	۱۴/۰۵۰	۶۰/۸۳۰
۴	۱۳/۸۸۷	۷۴/۷۱۷
۵	۵/۵۴۰	۸۰/۲۵۸



شکل ۶. آنالیز اهمیت نسبی پارامترهای ژئومورفومتری مؤثر بر اساس شاخص InMSE % در مدل RF

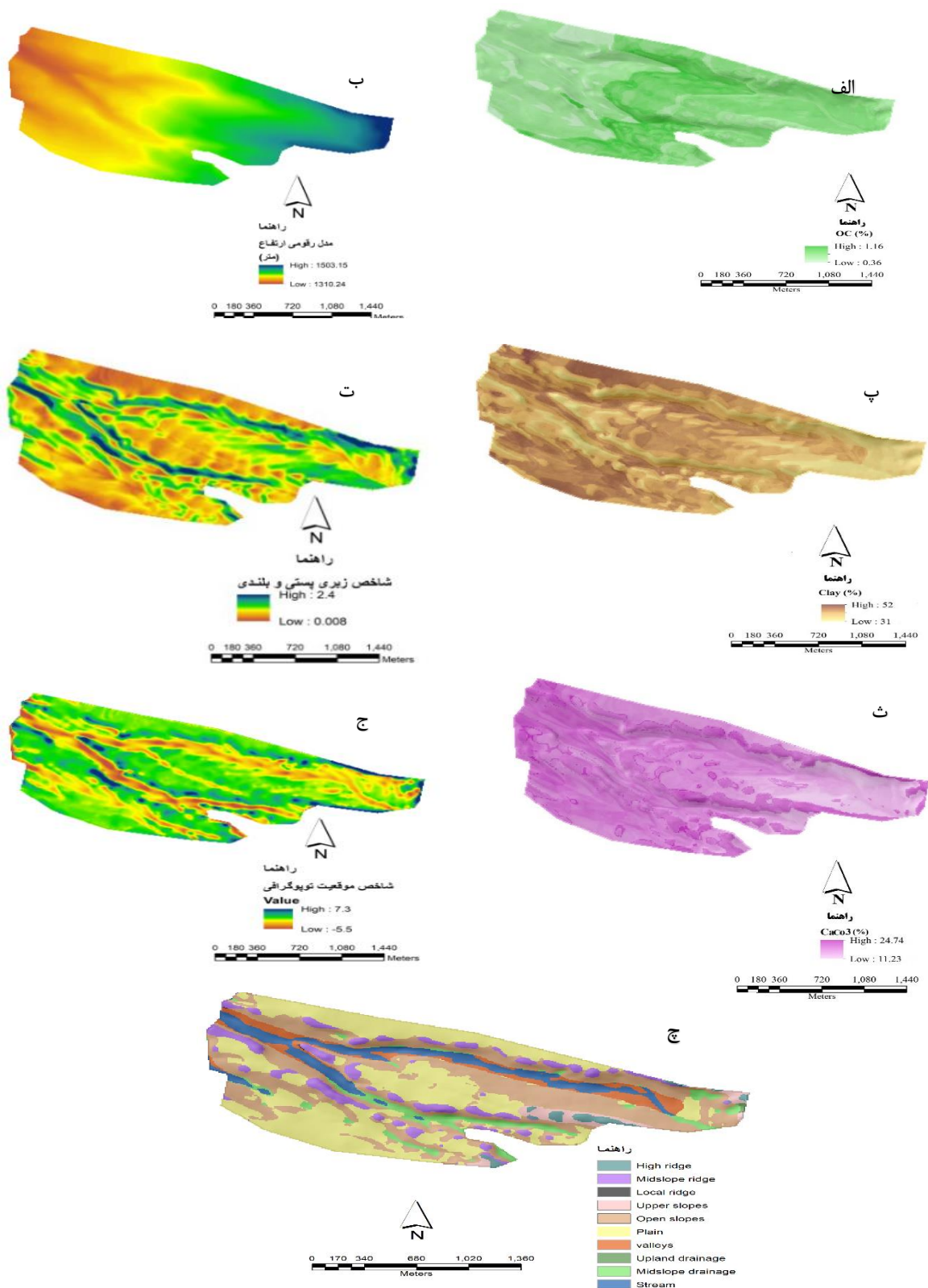
۳،۳. نقشه رقومی ویژگی‌های خاک

نقشه‌های پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک سطحی با استفاده از رویکرد جنگل تصادفی به عنوان مدل مناسب‌تر در شکل (۷) ارائه شده است. بیشترین میزان کربن آلی خاک سطحی با میزان ۱/۱۶ درصد در نواحی مرکزی مشاهده می‌شود (شکل ۷ الف)، این نواحی مطابق بر تراز ارتفاعی (شکل ۷ ب) ۱۳۸۱ تا ۱۴۱۰ متر و بالاتر از این تراز ارتفاعی، میزان درصد کربن آلی خاک به دلیل میزان بالای شاخص زبری پستی و بلندی و تأثیر آن بر فرسایش لایه سطحی خاک میزان کربن آلی افق سطحی کاهش می‌یابد. همچنین میزان بالای کربن آلی براساس نقشه شاخص زبری پستی و بلندی (شکل ۷ ت) در موقعیت‌های حداقل میزان پستی و بلندی و در مطابقت با نقشه واحدهای لندفرم در واحد لندفرم (شکل ۷ چ) دشت (نواحی مسطح) مشاهده گردید، از لحاظ پایداری، این سطح ژئومورفیک دارای پایداری بالاتر نسبت به دیگر لندفرم‌های مشاهده شده می‌باشد. بیشترین مقدار کربنات کلسیم (شکل ۷ ث) به میزان تقریبی ۲۵ درصد در موقعیت‌های یال فوقانی و شانه شیب مشاهده گردید که بر اساس مشاهدات میدانی (شکل ۸) و مطابقت با نقشه واحدهای لندفرم (شکل ۷ چ). کمترین میزان کربنات کلسیم با ۱۱ درصد در نواحی با میزان شاخص پستی و بلندی نزدیک به اعداد منفی که بیانگر نواحی آبراهه‌ها و دره‌ها با میزان شاخص زبری حداقل مشاهده گردید، بیشترین میزان درصد رس با ۵۲ درصد (شکل ۷ پ) در موقعیت‌های با شدت پستی و بلندی پایین و موقعیت‌هایی با میزان شاخص موقعیت توپوگرافیک (شکل ۷ ج) منفی و نزدیک به صفر که بر اساس نقشه واحدهای لندفرم به ترتیب با واحدهای آبراهه، دره‌ها و واحد سطوح پایدار ژئومورفیک (واحد دشت‌ها در نقشه لندفرم) مطابقت دارند و کمترین میزان درصد رس در نواحی با شدت پستی و بلندی حداکثر و موقعیت‌های بالایی شیب که در مطابقت با نقشه واحدهای لندفرم در واحدهای یال شیب میانی قرار می‌گیرد، از دلایل آن

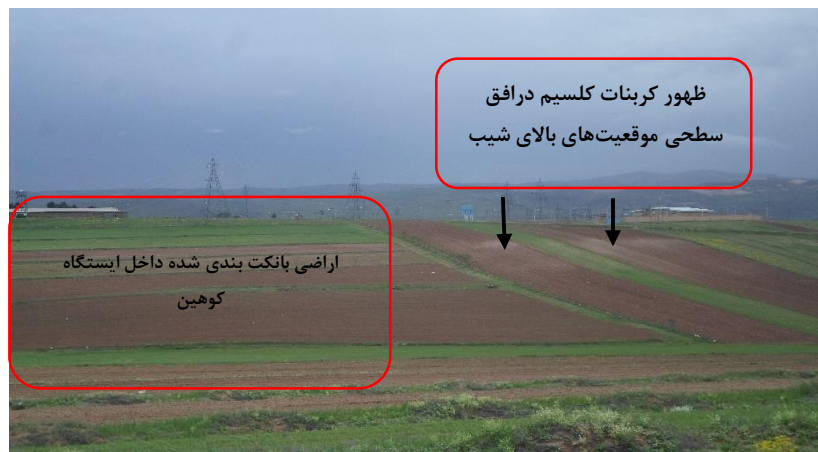
فرسایش بیشتر در این موقعیت‌ها و انتقال ذرات به موقعیت‌های پایین‌تر شیب مانند آبراهه و دره‌ها عنوان نمود که در همین راستا [۳] نتایج مشابهی را گزارش نمودند. در داخل ایستگاه کوهین به دلیل اقدامات حفاظتی از قبیل ترانس‌بندی، حفظ بقایای گیاهی و خاک‌ورزی به صورت عمود بر جهت شیب منجر به جلوگیری از فرسایش و انتقال رس گردیده است. در جهت شیب شمالی و خاک‌ورزی عمود بر شیب، بین موقعیت‌های مختلف آن از نظر میزان رس تفاوت معنی‌داری نداشته است، در همین جهت و خاک‌ورزی در راستای شیب، بین موقعیت بالا با دو موقعیت دیگر تفاوت معنی‌داری از نظر میزان رس وجود دارد [۵].

۴،۳. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها

نتایج اعتبارسنجی ارائه شده در جدول (۵) نشان می‌دهد که کربن آلی خاک در دو رویکرد داده‌کاوی جنگل تصادفی (RF) و مدل استنباطی خاک-زمین نما (SoLIM) به ترتیب دارای ضریب تبیین ۰/۶۳ و ۰/۴۷ با ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۱۷ تا ۰/۲ درصد، ویژگی رس دارای ضریب تبیین ۰/۷۵ و ۰/۴۲ با ریشه میانگین مربعات خطا ۷/۵ تا ۸/۰۸ درصد و ویژگی کربنات کلسیم خاک سطحی دارای ضریب تبیین ۰/۶۳ و ۰/۴۲ همراه با ریشه میانگین مربعات خطا ۵/۷۷ و ۴/۶۸ درصد می‌باشند. میانگین مطلق خطا پیش‌بینی برای سه ویژگی خاک در مدل SoLIM نسبت به مدل RF بالاتر است. اختلاف بین مقادیر MAE در ویژگی کربنات کلسیم قابل توجه می‌باشد، دو مدل مورد استفاده با توجه به مقادیر مثبت MAE دارای بیش برآورد می‌باشد ولی مدل RF بیش برآورد کمتری نسبت به مدل SoLIM در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک ارائه نموده است. براساس آماره Bias، در مدل SoLIM برای دو ویژگی کربن آلی و درصد رس بیش برآورد و ویژگی کربنات کلسیم، کم برآورد حاصل شده است، از طرفی نتایج مدل RF برای هر سه ویژگی خاک دارای کم برآورد می‌باشد [۲۳].



شکل ۷. نقشه پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک سطحی با استفاده از جنگل تصادفی و متغیرهای ژئومورفومتری موثر (الف) - درصد کربن آلی (ب) - مدل رقومی ارتفاع (متر) (پ) - درصد رس (ت) - شاخص زیری پستی و بلندی (ث) - درصد کربنات کلسیم معادل (ج) - شاخص موقعیت توپوگرافی (چ) - نقشه واحدهای لندفرم



شکل ۸. نمایی از کشت بر روی خطوط تراز و شخم در جهت شیب (منبع: نویسندگان)

جدول ۵. نتایج اعتبار سنجی دو رویکرد داده کاوی در مدل‌سازی پیش‌بینی ویژگی‌های خاک

مدل استنباطی خاک-زمین نما (SoLIM)				جنگل تصادفی (Random forest)				مدل
R2	RMSE(%)	MAE	Bias	R2	RMSE(%)	MAE	Bias	
۰/۴۷	۰/۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۶۳	۰/۱۷	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۱	کربن آلی
۰/۴۲	۸/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۷۵	۵/۷۷	۰/۱۰	-۰/۱۱	رس
۰/۴۲	۴/۶۸	۰/۰۳۶	-۰/۰۳۷	۰/۶۳	۷,۵	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	کربنات کلسیم

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در نهایت استفاده از این روش برای انتخاب بهینه لایه‌های محیطی پیشنهاد نمودند. لازم به ذکر است که تأثیرپذیری ویژگی‌های خاک سطحی از پارامترهای ژئومورفومتری بر اساس آنالیز حساسیت به عمل آمده در مدل جنگل تصادفی نتایج متفاوتی نشان داد، به طوری که در پیش‌بینی کربن آلی، درصد رس و کربنات کلسیم معادل به ترتیب پارامترهای ارتفاع، شاخص زبری پستی و بلندی و شاخص موقعیت توپوگرافی بیشترین درجه اهمیت را در پیش‌بینی ویژگی‌های مورد نظر ارائه نمودند. در این راستا [۴۹] تغییرپذیری کربن آلی خاک را در مناطق نیمه خشک متأثر از تغییرات ارتفاع و سایر پارامترهای ژئومورفومتری گزارش نمودند. [۴] در دشت‌های بهبهان در ارتباط با تأثیر متغیرهای محیطی بر پیش‌بینی مکانی کربن آلی خاک افق سطحی بیان داشتند که پارامترهای ژئومورفومتری بعد از شاخص‌های

در این پژوهش مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل استنباطی خاک-زمین نما با چهار متغیر ورودی مشترک که شامل شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص شدت پستی و بلندی و ارتفاع به همراه نقشه رستری واحدهای لندفرم بود، دقت بالاتری را در تهیه نقشه رقومی ویژگی‌های درصد کربن آلی، رس و کربنات کلسیم خاک سطحی ارائه نمود، [۴] از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای استخراج مؤلفه‌های تأثیر گذار بر تغییرپذیری ویژگی کربن آلی خاک بر اساس سه معیار واریانس جمعی، پلات غربال‌گری و مقادیر ارزش ویژه برای تعداد بهینه اجزاء و از رویکرد آنالیز مؤلفه‌های اصلی با تکرار هدفمند برای جداسازی پارامترهای ژئومورفومتری و سنجش از دور در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی خاک در یک اکوسیستم نیمه خشک مورد بررسی قرار دادند که

سنجش در مؤلفه اول تجزیه PCA از بیشترین درجه اهمیت برخوردار بودند. [۱۹،۲۸] در پژوهش‌های خود معتقدند که پارامترهای ژئومورفومتری نقش مهمی در پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های درصد کربنات کلسیم و رس دارند. [۴۷] نقش پارامترهای ژئومورفومتری و سنجش از دور را در پیش‌بینی مکانی کربن آلی خاک مؤثر و برای ویژگی‌های درصد رس و کربنات کلسیم اظهار داشتند که همبستگی معنی‌دار بین این دو ویژگی و پارامترهای ژئومورفومتری و سنجش از دور وجود ندارد. در مقادیر پایین از تراز ارتفاعی ۱۳۸۱ تا ۱۴۱۰ میزان کربن آلی خاک دارای پایین‌ترین مقدار خود در خاک سطحی می‌باشد، به ازای هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع به میزان ۰/۶ درجه سانتی‌گراد از متوسط دما کاسته می‌شود. تأثیر این اختلاف ارتفاع بر روی فاکتورهای غیر زیستی (دما) و زیستی (خصوصاً لاشبرگ و میکروارگانیسم‌ها) منجر به تغییرات ورودی کربن و تلفات آن خصوصاً در خاک سطحی می‌گردد و این کاهش دما سبب کاهش فعالیت میکروبی تجزیه کربن می‌گردد. بنابراین ارتفاع بالا تمایل به نگهداری کربن آلی به دلیل زمان طولانی‌تر برای تغییر و تبدیل آن در خاک خواهد شد [۳۹]. از دلایل دیگر بالا بودن میزان درصد کربن آلی خاک در اراضی داخل ایستگاه تحقیقاتی نسبت به اراضی مجاور می‌توان به اعمال روش‌های کشاورزی حفاظتی طی یک دهه اخیر در آن و نقش کاربری باغات الگویی دیم در جلوگیری از بهم خوردگی خاک سطحی در این کاربری‌ها، به عنوان یکی از عوامل خاک‌ساز (نقش انسان) در معادله پیش‌بینی مکانی خاک اسکورپن [۲۴] اشاره نمود. نقش انسان به عنوان یکی از عوامل خاک‌ساز با تراز ارتفاعی که در آن کربن آلی خاک بالاترین میزان در اراضی مورد مطالعه را داشته است، هم‌راستا شده است. میزان افزایش کربن آلی در افق سطحی را ۵۰ تا ۱۰۰ درصد در کشاورزی حفاظتی نسبت به اراضی غیر حفاظتی گزارش نمودند [۸]. موقعیت‌های یال فوقانی و شانه شیب دارای فرسایش سطحی شدید از نوع ورقه‌ای می‌باشند که منجر به ظهور کربنات کلسیم

افق‌های زیرین در افق سطحی خاک شده است [۱۳]. [۳] میزان کربنات کلسیم را در موقعیت‌های بالایی شیب (شانه شیب) در مقایسه با موقعیت‌های پایین شیب در افق‌های سطحی خاک بیشتر گزارش نمودند و در همین راستا همچنین ایشان بیان داشتند میزان کربنات کلسیم در افق‌های سطحی موقعیت‌های پای شیب و قله شیب را به دلیل دسترسی به رطوبت بیشتر ناشی از تجمع جریان بالادست و فرصت نفوذ مناسب کمتر از افق‌های سطحی موقعیت‌های بالایی شیب (شانه شیب و شیب پستی) گزارش نمودند. دلیل دیگر را تأثیر شیب بر افزایش فرسایش در موقعیت‌های بالایی شیب و ظهور آهک لایه زیرین بیان نمودند. در نواحی آبراهه‌ها و دره‌ها به دلیل تجمع جریان‌ات آب حاصل از بالادست و فرصت نفوذ مناسب کربنات کلسیم از افق سطحی شسته شده و میزان آن کاهش یافته است. [۵] اثر موقعیت شیب را بر روی تغییرات کربنات کلسیم در اراضی کوهین معنی‌دار گزارش نمودند. همچنین [۲۹، ۲۵] نیز نشان دادند که در قسمت‌های بالای شیب میزان کربنات کلسیم به دلیل فرسایش لایه سطحی خاک بیشتر از قسمت‌های پایینی شیب است که با نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا می‌باشد. در مطالعات متعددی توسط سایر پژوهشگران [۲۱، ۲] مدل جنگل تصادفی را به عنوان مناسب‌ترین روش در مدل‌سازی و نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک و سایر ویژگی‌های سطحی خاک مشابه با نتایج این تحقیق گزارش شده است. مدل جنگل تصادفی یک ارتباط غیر خطی بین ویژگی‌های خاک و پارامترهای محیطی ایجاد می‌نمایند و منجر به ارائه نتایج مناسب‌تر نسبت به سایر مدل‌ها می‌گردد [۱۴، ۲۳]. [۴۴] برای ویژگی‌های کربن آلی، رس و کربنات کلسیم، مقادیر ضرایب تبیین ۰/۵۵، ۰/۱۵ و ۰/۳۰ با ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۳۳، ۷/۸۶ و ۹/۵۲ درصد در استفاده از مدل جنگل تصادفی به عنوان بهترین مدل در مقایسه با مدل کوبیست، رگرسیون درختی و رگرسیون چندمتغیره خطی گزارش نمودند. [۴۱] در نقشه کربن آلی پیش‌بینی شده با روش

اعمال می‌گردد، که اراضی موجود در ایستگاه با مدیریت خاک ورزی عمود بر جهت شیب و اراضی بیرون ایستگاه با مدیریت خاک ورزی در جهت شیب صورت می‌پذیرد که این دو رویکرد متفاوت موجب شده است تا ویژگی‌های خاک روندهای متفاوتی را از خود نشان دهند، از طرفی به دلیل اینکه سه ویژگی درصد کربن آلی، کربنات کلسیم معادل و رس که از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در تعیین سری خاک می‌باشند و هر گونه مدیریت می‌تواند به نحو جدی تغییرات این ویژگی‌ها را از جنبه مدیریت و بهره‌برداری از اراضی را تحت تأثیر قرار دهد.

جنگل تصادفی میزان ضریب تبیین ۳۲ درصد را گزارش نمودند. برای نقشه‌برداری رقومی ویژگی‌های خاک مقادیر R2 بالاتر از ۰/۷ غیر معمول و مقادیر ۰/۵ و یا کمتر رایج می‌باشد [۲۳]. بنابراین پیشنهاد می‌گردد با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه پارامترهای ژئومورفومتری دارای واریانس مناسب برای توجیه تغییرپذیری ویژگی‌های خاک سطحی بودند از مدل جنگل تصادفی به دلیل برقراری ارتباط غیرخطی بین پارامترهای محیطی و ویژگی‌های خاک در نواحی مسطح جهت مدلسازی مکانی ویژگی‌های خاک استفاده گردد. دو نوع مدیریت بسیار شاخص بر روی اراضی مورد نظر

References

- [1] Akpa, S. I., Odeh, I. O., Bishop, T. F. and Hartemink, A. E. (2014). Digital mapping of soil particle-size fractions for Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 1953-1966.
- [2] Akpa, S.I.C., Odeh, I.O.A., Bishop, T.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] Alijani, Z. and Sarmadian, F. (2014). The role of topography in changing of soil carbonate content. *Indian Journal Science Research*, 6(1), 263-271.
- [4] Amiranchekan, A., Taghizadeh mehrjerdi, R., Sarmadian, F. Haidari, A. (2017). Three-dimensional mapping of soil texture final particle size distribution using depth equations and artificial neural networks. *Journal of water and soil research*, 48(1), 113-123.
- [5] Asadi, H., Khoshrang, H. and Ebrahimi, E. (2017). Effect of tillage direction and slope position on some soil physical and chemical properties and of aggregations stability. *Journal of water and soil research*. 48(1), 217-230.
- [6] Bishop, M.P., James, L.A., Shroder, J.F., and Walsh, S.J. (2012). Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. *Geomorphology*, 137, 5–26.
- [7] Gallant, J.C. and Dowling, T.I. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resource. Res.* 39, 1347–1359.
- [8] Gorji, M. and Goodarzvand chegini, Kh. (2019). Sustainable management of soil resources promises sustainable agriculture establishment. 16th Iranian soil science congress. University of Zanjan, Iran, August 27-29.
- [9] Hamzehpour, N., Shafizadeh-Moghadam, H., & Valavi, R. (2019). Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture. *CATENA*, 182, 104141.
- [10] Hengl, T., and Reuter, H.I., (2009). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science, 33. Elsevier, Amsterdam.
- [11] Heung, B., Ho, H. C., Zhang, J., Knudby, A., Bulmer, C. E. and Schmidt, M. G. (2016). An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping. *Geoderma*, 265, 62-77.
- [12] Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L. and Böhner, J. (2015). System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007.

- [13] Dessalegn, D., Beyene, S., Ram, N., Walley, F., & Gala, T. S. (2014). Effects of topography and land use on soil characteristics along the toposequence of Ele watershed in southern Ethiopia. *Catena*, 115, 47-54.
- [14] Ding, J.Z., Li, F., Yang, G.B., Chen, L.Y., Zhang, B.B., Liu, L., Fang, K., Qin, S.Q., Chen, Y.L., Peng, Y.F., Ji, C.J., He, H.L., Smith, P. and Yang, Y.H. (2016) The permafrost carbon inventory on the Tibetan plateau: a new evaluation using deep sediment cores. *Glob Chang Biol*, (22), 2688–2701.
- [15] Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 137(1), 94-106.
- [16] Efron, B. and Tibshirani, R.J. (1994). *An Introduction to the Bootstrap*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- [17] Forkuor, G., Hounkpatin, O.K., Welp, G. and Thiel, M. (2017). High resolution mapping of soil properties using remote sensing variables in South-Western Burkina Faso: a comparison of machine learning and multiple linear regression models. *PLoS One*, 12, e0170478.
- [18] Guo, zh., Adhikari, A., Chellasamy, M., Grevec, M.B., Owens, R., Greve, M. (2019), Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction. *Geoderma*, 340, 303–312.
- [19] Jafari, A., Finke, P. A., Vande Wauw, J., 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. *European Journal of Soil Science*, 63(2), 284-298.
- [20] Kaufmann, M., Meier, A. and Stoffel, K. (2015). IFC-Filter: Membership function generation for inductive fuzzy classification. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 8369-8379.
- [21] Kouadio, L., Deo, R.C., Byrareddy, V., Adamowski, J.F., Mushtaq, S. and Nguyen, V.P. (2018) Artificial intelligence approach for the prediction of Robusta coffee yield using soil fertility properties. *Comput Electron Agr* 155, 324–338.
- [22] Khamoshi, S. E., Sarmadian, F. and Keshavarzi, A. (2018). Digital Soil Mapping Using Random Forests Model and Land Suitability Assessment for a Part of Abyek Region, Qazvin Province., 71(4), 885-899.
- [23] Malone, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). *Using R for digital soil mapping*. Basel, Switzerland: Springer International Publishing.
- [24] McBratney, A.B.; Santos, M.L.M. and Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3-52.
- [25] Mehdizade, B., Asadi, H., Shabanpour, M. and Ghadiri, H. (2013). The impact of erosion and tillage on the productivity and quality of selected semiarid soils of Iran. *Intern. Agrophysics*. 27, 291-297.
- [26] Menezes, M. D. D., Silva, S. H. G., Mello, C. R. D., Owens, P. R. and Curi, N. (2018). Knowledge-based digital soil mapping for predicting soil properties in two representative watersheds. *Scientia Agricola*, 75(2), 144-153.
- [27] Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Rahmani, A. and Khamoshi, S.E. 2019. Preparation of Digital Soil Mapping Classes at Different Soil Taxonomic Levels by Using Random Forest Model. 16th Iranian Soil Science Zanzan University.
- [28] Nabiollahi, K., Haidari, A., Taghizadeh Mehrjerdi, R. (2014) Digital Mapping of Soil Texture Using Regression Tree and Artificial Neural Network in Bijar, Kurdistan, 28(5), 1025-1036.
- [29] Nazmi, L., Asadi, H. and Manukyan, R. (2011). Changes in soil properties and productivity as affected by land use and slope position in the northwest of Iran. *J. Food, Agric. Environ*, 9(3&4), 864-870.
- [30] Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L. and Papritz, A. (2018). Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil*, 4(1), 1-22.
- [31] Olaya, V. and Conrad, O. (2009). Geomorphometry in SAGA. *Developments in soil science*, 33, 293-308.
- [32] 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.
- [33] Pelegrino, M. H. P., Silva, S. H. G., Menezes, M. D. D., Silva, E. D., Owens, P. R. and Curi, N. (2016). Mapping soils in two watersheds using legacy data and extrapolation for similar surrounding areas. *Ciencia e Agrotecnologia*, 40(5), 534-546.
- [34] Pike, R.J., Evans, I., and Hengl, T., (2008). Geomorphometry: A Brief Guide. In: *Geomorphometry-Concepts, Software, Applications*, Hengl, T. and Hannes I. Reuter (eds.), Series *Developments in Soil Science*, Elsevier, 33, 3-33.

- [35] Schillaci, C., Acutis, M., Lombardo, L., Lipani, A., Fantappie, M., Marker, M., Saia, S., ۲۰۱۷. Spatio-temporal topsoil organic carbon mapping of a semi-arid Mediterranean region: the role of land use, soil texture, topographic indices and the influence of the remote sensing data to modeling. *Sci. Total Environ.* 601-602, 821–832.
- [36] Sepahvand, A. R., Ahmadi, H., Nazari Samani, A. k. and Toriciani, S. (2019). Classification of karstic anomalies using Geomorphometric indices and artificial neural network (A case study: Part of Khorramabad, Biranshahr and Alashtar basins). *Rangeland and Watershed management journal.* 72, 107-122.
- [37] 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*, 266, 98–110.
- [38] Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., Malone, B. and (2014). Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213, 15–28.
- [39] Tsui, C. C., Tsai, C. C., & Chen, Z. S. (2013). Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma*, 209, 119-127.
- [40] Viscarra Rossel, R. A., Webster, R. and Kidd, D. (2014). Mapping gamma radiation and its uncertainty from weathering products in a Tasmanian landscape with a proximal sensor and random forest kriging. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(6), 735-748.
- [41] Wang, B., Waters, C., Origill, S., Gray, J., Cowie, A., Clark, A., Liu, D.L., 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Sci. Total Environ.* 630, 367–378.
- [42] Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).
- [43] Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability. Workshop*, 166-194.
- [44] Wilson, J. (2018). *Environmental applications of digital terrain modeling.* John Wiley & Sons. 359pp.
- [45] Zeng, C., Yang, L. and Zhu, A. (2017). Construction of membership functions for soil mapping using the partial dependence of soil on environmental covariates calculated by random forest. *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 341-353.
- [46] Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Sulieman, M., & Rodrigo-Comino, J. (2019). Determining the spatial distribution of soil properties using the environmental covariates and multivariate statistical analysis: a case study in semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Land*, 1-16.
- [47] Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S and Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*, 338, 445-452.
- [48] Zhu, A.X., Burt, J.E. and Du, F. (2015). *Digital soil mapping software: SoLIM Solutions. user manual.*
- [49] Zhu, M., Feng, Q., Zhang, M., Liu, W., Deo, R. C., Zhang, C. and Yang, L. (2019). Soil organic carbon in semiarid alpine regions: the spatial distribution, stock estimation, and environmental controls. *Journal of Soils and Sediments*, 1-15.

