

معرفی نقشه برداری رقومی خاک

محمدرضا پهلوانراد^۱، نورایر تومانیان و فرهاد خرماالی

بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زابل،

ایران. pahlavanrad@gmail.com

بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان،

ایران. norairtoomanian@gmail.com

گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. khormali@yahoo.com

دریافت: آبان ۱۳۹۵ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

چکیده

نقشه برداری رقومی خاک یکی از زیرشاخه های علم خاکشناسی است که در سال ۲۰۰۳ توسط مک براتنی و همکاران او معرفی شد و از آن زمان تاکنون پیشرفت ها و خروجی های تحقیقاتی زیادی در سطح جهانی داشته است. نقشه برداری رقومی خاک عبارت از ایجاد و جمع آوری سیستم های اطلاعات مکانی خاک با استفاده از روش های مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی که با داده های محیطی از طریق ارتباطات کمی همراه شده اند. نقشه برداری رقومی خاک منجر به ایجاد خروجی به صورت نقشه رستری تخمین، همراه با عدم قطعیت پیش بینی می شود. افزایش دسترسی به داده های مکانی مانند مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره ای، افزایش نیروی محاسباتی برای پردازش داده ها، توسعه ابزارهای داده کاوی و سامانه اطلاعات جغرافیایی و افزایش تقاضای جهانی به داده های مکانی دارای ارزیابی عدم قطعیت از عوامل تاثیر گذار در موفقیت نقشه برداری رقومی خاک بوده اند. در این مقاله به وضعیت تکاملی نقشه برداری رقومی خاک، متغیرهای کمکی، مثال هایی از مدل سازی و مطالعات انجام شده در ایران پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: نقشه خاک، مدل سازی خاک، عدم قطعیت.

۱ - آدرس نویسنده مسئول: زابل، بلوار شهید میرحسینی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سیستان.

²Digital soil mapping

مقدمه

کلاس‌ها یا خصوصیات خاک) و داده‌هایی که به آسانی و با قیمت ارزان از طریق روش‌های سنجش‌ازدور، تصاویر و عکس‌های ماهواره‌ای و داده‌های ژئومورفومتری بدست می‌آیند و تحت عنوان متغیرهای کمکی محیطی^۹ نامیده می‌شوند، می‌باشد. تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک بر روی محاسبات رقومی استوار هستند، اما اساس آن‌ها بر روی معادلات تشکیل خاک قرار دارد. نقشه‌برداری رقومی خاک محدود به رشته علوم خاک نبوده و در مطالعات اقلیم، هیدرولوژی، پوشش گیاهی و ... کاربرد دارد.

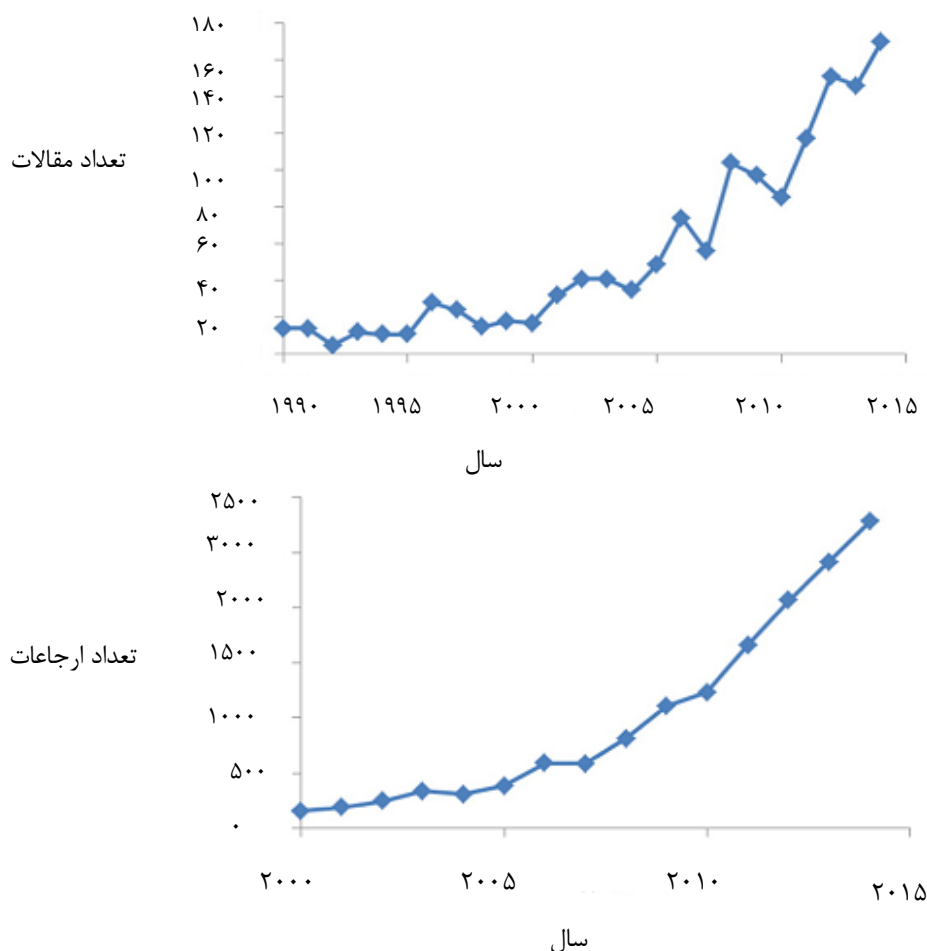
در حال حاضر نقشه‌برداری رقومی خاک به عنوان یکی از زیرشاخه‌های موفق علوم خاک مطرح شده است، به‌طوری‌که تعداد مقالات و ارجاعات مربوط به آن به سرعت در حال افزایش است (مینازنی و مک‌براتی، ۲۰۱۵، شکل ۱) پایه و اساس نقشه‌برداری رقومی خاک معادله ینی^{۱۰} (۱۹۴۱) است که بر اساس آن تشکیل و تکامل خاک بر روی یک زمین‌نما تابعی از پنج فاکتور محیطی است و تحت عنوان CIORPT نامیده می‌شود، معرفی کرد. این رابطه به صورت $S = f(C, I, O, R, P, T)$ تعریف شده است، که S: مبین تشکیل و تکامل خاک، CI: مبین اقلیم، O: مبین ارگانسیم زنده که اکثراً^{۱۱} به صورت پوشش گیاهی بیان می‌شود، R: مبین توپوگرافی یا پستی و بلندی، P: مبین مواد مادری و T: مبین زمان می‌باشند. پس از آن تلاش‌هایی برای کمی کردن فاکتورهای خاکسازی صورت گرفت. در سال‌های اولیه بعد از ارائه این تئوری، حل کمی معادله تجمیعی به ندرت از مدل‌های رگرسیونی ساده فراتر می‌رفت. یالون (۱۹۷۵) با بررسی تمام مطالعات وقت، با اشاره به بعضی از نقائص مدل ینی (۱۹۴۱) و باتلر (۱۹۶۴) سوالاتی با این مضامین را مطرح کرد؛ آیا مدل کمی فاکتورهای خاکسازی قابل حل می‌باشد؟ اصلاً علم پدولوژی قابل کمی‌سازی (علت و معلولی شدن) می‌باشد؟

نگرانی‌های جهانی در مورد غذا و تغییر اقلیم و افزایش آگاهی‌ها در مورد اهمیت مدیریت پایدار خاک در حفاظت و نگهداری خاک برای جامعه و محیط، منجر به توجه بیشتر به اهمیت مطالعات خاک در سازمان ملل متحد، بانک جهانی و فائو گردیده است (کمپن، ۲۰۱۱). تمایلات جدید جهانی به موضوع خاک، سبب افزایش تقاضا برای نقشه‌های دقیق، به‌روز شده و دارای اطلاعات مکانی با بزرگ‌نمایی بالا گردیده است که هدف آن سنجش اثرات تهدید کننده‌های خاک، روی وظایف خاک، مطالعه نقش خاک به عنوان یک منبع گازهای گلخانه‌ای و حمایت از سیستم‌های مدیریت منابع خاک برای امنیت تولید غذا می‌باشد.

نقشه‌برداری رقومی خاک^۳

نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) عبارت از ایجاد و جمع‌آوری سیستم‌های اطلاعات مکانی خاک با استفاده از روش‌های مشاهدات میدانی و آزمایشگاهی است که با سیستم‌های استنتاج مکانی و غیر مکانی خاک همراه شده‌اند که منجر به ایجاد خروجی به صورت نقشه رستری تخمین، همراه با عدم قطعیت پیش‌بینی می‌شود. (لاگاشری و مک‌براتی، ۲۰۰۶). اصطلاحات دیگری مانند کارتوگرافی خاک به کمک کامپیوتر^۴، کارتوگرافی عددی خاک^۵، نقشه‌برداری پدومتری^۶، همبستگی محیطی^۷، نقشه‌برداری پیش‌بینی خاک^۸ و برون‌یابی ژئوگرافیکی با استفاده از مدل‌ها، استفاده و پیشنهاد شده است (مینازنی و مک‌براتی، ۲۰۱۵). مفهوم نقشه‌برداری رقومی خاک اولین بار توسط مک‌براتی و همکاران (۲۰۰۳) ارائه گردید. در واقع نقشه‌برداری رقومی خاک شامل استفاده از روش‌ها و مدل‌های مختلف، جهت ایجاد ارتباط بین توزیع خاک

^۳Digital soil mapping^۴Computer-assisted soil cartography^۵Numerical soil cartography^۶Pedometric mapping^۷Environmental correlation^۸Predictive soil mapping^۹Environmental covariates^{۱۰}Jenny

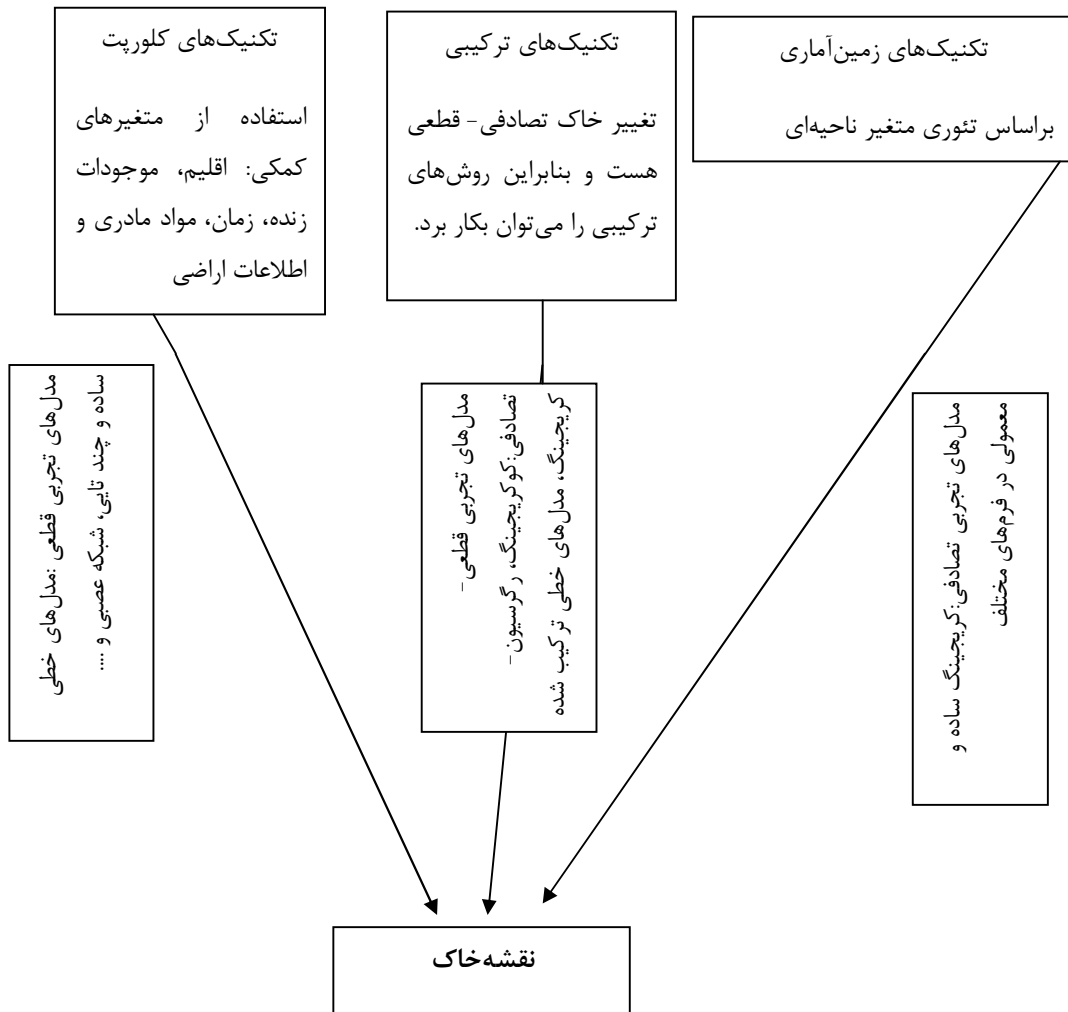


شکل ۱- تعداد مقالات و ارجاعات جستجو شده از کلمه کلیدی "نقشه برداری رقومی خاک" در پایگاه اسکوپوس (از میناسنی و مک براتنی ۲۰۱۶).

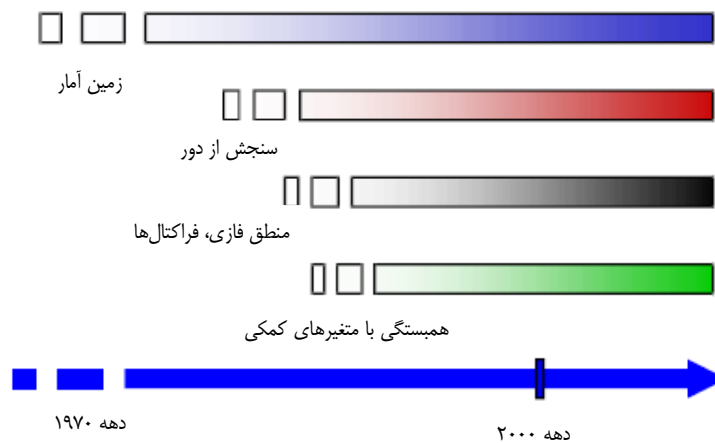
نیست) لذا در آن زمان مجبور بودند هم سمت راست مدل ینی (کلاس خاک و متغیرهای وابسته به آن) و هم سمت چپ آن را متغیرهای تصادفی فرض کنند. با تمامی این اوصاف مدل‌های رگرسیون، حتی برای حالت‌های استاتیک، نیز کارایی کامل نداشتند. بنابراین احتیاج به یک بینش متکی به روابط چندمتغیره کاربردی^{۱۱} حس می‌گردید. برای اعمال نمودن روابط غیرخطی بین عوامل و خصوصیات تشکیل و تکامل‌دهنده خاک‌ها و متغیرهای وابسته به آن روش‌های روبااست^{۱۲} (مدل‌هایی که کمتر

از آنجایی که فاکتورهای خاک‌سازی (به صورت فاکتورهای حالت) همراه با فرآیندهای خاک‌سازی متعدد بوده و همواره وابستگی بینابینی نیز داشتند، لذا روابط ساده خطی مدل‌های آن زمان توانایی بیان واقعیت طبیعی را نداشتند و نیاز به تعریف روابط غیرخطی حس می‌شد. برای وارد کردن تعداد متغیرهای مستقل به مدل و ساده‌سازی آن، تجزیه به عامل‌های اولیه مولفه‌های اصلی وارد مدل‌ها شدند. با این که می‌دانستند دنیا تحت قوانین مشخصی پیش می‌رود اما منابع متناهی از تغییرات و فرآیندها در دنیا وجود داشت که نحوه عمل دقیق آن‌ها را هنوز معلوم ننموده بودند (احتمالا هنوز هم کاملا معلوم

¹¹ Multivariate Functional Relation
¹² Robust Model



شکل ۲- نگرش‌های مختلف به مدل کردن تغییرات خاک‌ها در طبیعت (از میناسنی و مک براتنی ۲۰۱۶).



شکل ۳- علوم مختلفی که در شکل‌گیری و تکامل پدومتری در اوایل دهه اول قرن بیست و یکم دخالت داشتند.

متغیرهای کمکی محیطی مورد استفاده در نقشه برداری رقومی خاک

متغیرهای کمکی محیطی در واقع نماینده عوامل خاکساز هستند. اکثر متغیرهای محیطی با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM)، داده‌های طیفی سنجنش از دور^{۲۱} و نقشه‌های حاصل از مطالعات گذشته بدست می‌آید. تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی این امکان را فراهم می‌سازد تا تأثیر خصوصیات مانند ژئومورفولوژی و موقعیت خاک در زمین‌نما، وضعیت تکاملی خاک، وضعیت مکانی رطوبت بر اساس انحنای اراضی، وضعیت توزیع پوشش گیاهی، اثر توپوگرافی و عمق وضعیت رسوبات زمین‌شناسی و اثر انسان در محاسبات لحاظ گردد. در زیر فاکتورهای معادله متغیرهای کمکی scorpan که از طریق سنجنش از دور تهیه می‌شوند و در نقشه برداری رقومی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند ارائه می‌گردد.

خصوصیات خاک و مواد مادری

(S و P در مدل SCORPAN)

تیپ خاک، توسعه خاک و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تأثیر مواد مادری می‌باشد. مواد مادری خاک نتیجه اثرات متقابل فرآیندهای ژئومورفیک با سنگ بستر در طی زمان طولانی می‌باشد. ژئومورفولوژی خاک یک منبع مفید اطلاعات برای سنجنش مواد مادری خاک و سایر اطلاعات خاک به-خصوص در مناطق خشک است (جعفری و همکاران، ۲۰۱۲). اختلاف در مواد مادری و توسعه خاک به طور عمده‌ای به وسیله واحدهای ژئومورفولوژی مختلف نشان داده شده است (استوروگل^{۲۲}، ۲۰۰۹). جعفری و همکاران (۲۰۱۲) نقشه ژئومورفولوژی را مهمترین تخمین‌گر در پیش‌بینی کلاس‌های خاک در خاکه‌های منطقه زرنند کرمان یافتند. تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (۲۰۱۴) از نقشه

ژئومورفولوژی در تهیه نقشه شوری خاک به عنوان متغیر کمکی استفاده نمودند. استوروگل (۲۰۰۹) عوامل ژئومورفولوژی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی را به عنوان عوامل موثر بر تغییر مکانی کربن آلی خاک، در مطالعات خود استفاده کردند. کمپن^{۲۳} و همکاران (۲۰۰۹) واحدهای ژئومورفولوژی را به عنوان داده‌های متغیر کمکی برای به‌روز کردن نقشه‌های خاک ۱:۵۰,۰۰۰ در هلند بکار بردند. پهلوان راد و همکاران (۲۰۱۶) از نقشه‌های خاک قدیمی به عنوان متغیر کمکی در مطالعات نقشه برداری خاک در بخشی از استان گلستان استفاده کردند.

مواد آلی / پوشش گیاهی (O در SCORPAN)

مواد آلی، با تأثیر روی جریان‌های انرژی و شیمیایی در سولوم^{۲۴} خاک و فضای خاک-کره (پدوسفر) تشکیل و تکامل خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (بیول، ۲۰۰۳). در حالی که مفهوم مواد آلی به عنوان یک عامل تشکیل خاک در مدل‌های ینی (۱۹۴۱) و مک برانتی (۲۰۰۳)، گونه‌های (درشت و ریز) گیاهی و جانوری را شامل می‌شود، مدل سازی اثرات جانوران روی تشکیل خاک غیر عملی است. بنابراین در مطالعات رقومی، پوشش گیاهی را به عنوان نماینده موجودات زنده مدل ینی در نظر می‌گیرند.

پوشش گیاهی، جذب و انعکاس امواج الکترومغناطیس از سطح اراضی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین می‌تواند با استفاده از تصاویر ماهواره تعیین گردد. تشعشعات خورشیدی در قسمت مرئی امواج الکترومغناطیس (۰/۷۰-۰/۳۵ میکرومتر) زیاد است و گیاهان از این انرژی مرئی برای فتوسنتز استفاده می‌کنند (جنسن، ۲۰۰۵). گیاهان غالباً نور آبی (۰/۴۵ میکرومتر) و قرمز (۰/۶۵ میکرومتر) را جذب می‌کنند، در حالی که انرژی مادون قرمز نزدیک (۱/۲-۰/۷۵ میکرومتر) را منعکس می‌کنند (جنسن، ۲۰۰۵). این تمایز زیاد بین

²³Kempen
²⁴Solum

²¹Remote sensing
²²Stoorvogel

گوارتس^{۳۲} (۲۰۰۰) سه مدل زمین آماری چند متغیره را جهت استفاده از مدل رقومی ارتفاع در پیش‌بینی مکانی بارندگی مقایسه کرد. او مشاهده کرد که کریجینگ معمولی وقتی همبستگی بین بارندگی و ارتفاع متوسط بود، پیش‌بینی بهتری نسبت به رگرسیون خطی داشت. داهلگرن^{۳۳} و همکاران (۱۹۹۷) دریافتند که تغییر اقلیم در یک ترانسکت ارتفاعی در نوادای کالیفرنیا، توزیع کربن آلی، اشباع بازی، pH و کانی‌شناسی رس را تحت تاثیر قرار می‌دهد. هنگل (۲۰۰۲) داده‌های اقلیمی (بارندگی و درجه حرارت) را برای ایجاد نقشه‌های pH و ماده آلی خاک در کرواسی استفاده کرد. ثابت شده است که کمی-سازی اقلیم برای نقشه‌برداری رقومی خاک مشکل است. مک براتنی و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که فقط پنج درصد مقالات مرور شده در مورد نقشه‌برداری رقومی خاک اقلیم را به صورت مستقیم به عنوان یک متغیر کمکی استفاده کردند. به هر حال چون پروژه‌های نقشه برداری رقومی در سطح بزرگ‌تری انجام می‌شوند، داشتن داده‌های معتبر اقلیمی ضرورت دارد. سومر^{۳۴} و همکاران (۲۰۰۸) از اقلیم برای پیش‌بینی ماده آلی خاک و مقدار فرسایش و رسوب خاک استفاده کردند.

پستی و بلندی (R در SCORPAN)

مک براتنی و همکاران (۲۰۰۳) مطالعات انجام شده در مورد کلاس‌های خاک را خلاصه کردند و مشاهده کردند که فاکتور غالب استفاده شده در مطالعات مختلف، پستی و بلندی بوده است. توپوگرافی، توزیع آب در عمق و سطح یک زمین نما را تحت تاثیر قرار می‌دهد، در نتیجه تشکیل خاک را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد (مور^{۳۵} و همکاران، ۱۹۹۳). بنابراین، مدل‌سازی سیمای زمین نما که اغلب به عنوان تحلیل سرزمین^{۳۶} نامیده می‌شود) مانند شیب و جهت برای پیش‌بینی جریان آب در نقشه‌برداری

انعکاس نور قرمز و مادون قرمز نزدیک می‌تواند برای شناسایی پوشش گیاهی استفاده شود.

شاخص‌هایی مانند شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته خاک (SAVI^{۲۵})، شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته خاک تغییر یافته (TSAVI^{۲۶}) و شاخص نسبت پوشش گیاهی (RVI^{۲۷}). شاخص پوشش گیاهی نامتجانس (DVI^{۲۸}) و شاخص پوشش گیاهی عمود (PVI^{۲۹}) برخی از شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در نقشه‌برداری رقومی خاک هستند.

یکی از متداولترین شاخص‌ها، شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده^{۳۰} است که از معادله زیر بدست می‌آید (روز و همکاران، ۱۹۷۴):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

که دامنه آن از -۱ تا +۱ تغییر می‌کند. NIR و Red به ترتیب مقادیر انعکاس امواج مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند.

اقلیم (C در SCORPAN)

اقلیم توسعه خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. متغیرهای اقلیمی مانند درجه حرارت، بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل می‌توانند به عنوان تخمین زننده^{۳۱} برای طبقه‌بندی خاک استفاده شوند (مک براتنی، ۲۰۰۳). اسکال و همکاران (۲۰۰۵) درجه حرارت سطحی و بارندگی بدست آمده از ایستگاه‌های اقلیمی و مقادیر ارتفاع اراضی بدست آمده از مدل رقومی ارتفاع را در مدل‌سازی اقلیم استفاده کردند.

²⁵Soil Adjusted Vegetation Index

²⁶Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

²⁷Ratio vegetation index

²⁸Divergence vegetation index

²⁹Perpendicular vegetation index

³⁰Normalized Difference Vegetation

Index

³¹Predictor

³²Goovaerts

³³Dahlgren

³⁴Sommer

³⁵Moore

³⁶Terrain analysis

موقعیت مکانی

استفاده از داده‌های دقیق مکانی جزو لاینفک نقشه برداری رقومی خاک است. در نظر گرفتن مقدار یک پیکسل در ارتباط با همسایه های آن یا مفهوم مکانی آن می‌تواند طبقه بندی را بهبود دهد (موران و بیوی، ۲۰۰۲). موقعیت مکانی نقاط می‌تواند به راحتی توسط سیستم موقعیت یاب جهانی تعیین شود.

مدلسازی

ابزارهای فراوان و مختلفی در نقشه برداری رقومی خاک استفاده می‌شوند. این مواد شامل توابع انتقالی^{۴۲}، زمین آمار، مدل‌های آماری تجربی، طبقه بندی فازی، تصمیم گیری درختی^{۴۳} درختان تصمیم گیری تصادفی^{۴۴}، رگرسیون منطقی دو جمله‌ای^{۴۵} و چند جمله‌ای^{۴۶}، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون بردار پشتیبان^{۴۷}، مدل گرادیان تصادفی تقویت^{۴۸} و خیلی مدل‌های دیگر هستند. در ادامه استفاده نقشه برداری خاک در مدل سازی کلاس‌ها و خصوصیات خاک، به روز رسانی نقشه خاک، نمونه برداری خاک و روش هوموسویلز بررسی شده است.

مدل سازی کلاس‌ها و خصوصیات خاک

اسکال و همکاران (۲۰۰۵) روش درخت طبقه بندی^{۴۹} را برای تخمین تیپ خاک در یک زمین نمای بیابانی بکار بردند و نتیجه گرفتند که این تکنیک می‌تواند در نقشه برداری خاک برای برون یابی ارتباطات زمین نما از یک مکان به مکان دیگر استفاده شود. برنز و همکاران (۲۰۰۵) شبکه عصبی مصنوعی را برای پیش بینی مکانی واحدهای خاک در آلمان استفاده کردند. ادھیکاری^{۵۰} و

رقومی خاک مفید است. ویلسون^{۳۷} و گالانت^{۳۸} (۲۰۰۰) توصیف کاملی از خصوصیات اولیه و ثانویه اراضی که می‌تواند برای پیش بینی توزیع خاک استفاده شود ارائه کرده‌اند. مدل رقومی ارتفاع، نماینده رقومی توپوگرافی سطح زمین است. از مدل رقومی ارتفاع می‌توان خصوصیات اراضی که وضعیت طبیعی سطح زمین را نشان می‌دهد را استخراج کرد. برخی از این متغیرها شامل شیب، جهت، طول جریان، انحنای عمودی و افقی^{۳۹} سطح اراضی هستند. جعفری و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که مشتقات مدل رقومی ارتفاع شامل شاخص خیزی، شیب، انحنای و شاخص همواری دره با کیفیت بالا، از متغیرهای پیش بینی کننده موثر در مطالعه آنها بود. برخی مطالعات نیز نشان داده که فاکتور توپوگرافی در مدل سازی اهمیت زیادی نداشته است (ریورو^{۴۰} و همکاران، ۲۰۰۷) این مساله به خصوص در مناطق مسطح ممکن است اتفاق بیفتد. اکرمخانوف^{۴۱} و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط معنی داری بین خصوصیات سرزمین و داده‌های شوری خاک به علت کم بودن ارتفاع منطقه مشاهده نکردند.

زمان

فاکتور زمان را به سختی می‌توان با دقت بالا اندازه گیری کرد (مک براتنی و همکاران، ۲۰۰۳؛ نولر، ۲۰۱۰). در بهترین حالت فقط زمان نسبی بدون انجام فرآیندهای سن سنجی گران قیمت و مشکل مانند لومینیسنس، سن سنجی ایزوتوپی و برخی روش‌های دیگر می‌تواند در نظر گرفته شود. سطوح و موقعیت ژئومورفیک ممکن است سن نسبی را به صورت تقریبی ارائه کنند (نولر، ۲۰۱۰).

⁴²Pedotransfer

⁴³Decision tree

⁴⁴Random forest

⁴⁵Binary logistic regression

⁴⁶Multinomial logistic regression

⁴⁷Support Vector Regression

⁴⁸Stochastic Gradient Boosting

⁴⁹Classification tree

⁵⁰Adhikari

³⁷Wilson

³⁸Gallant

³⁹Plan and profile curvature

⁴⁰Rivero

⁴¹Akramkhanov

بین ۷۲ تا ۷۴ درصد و شاخص کاپای از ۰/۶۲ تا ۰/۶۴ پیش بینی کرد. دبال-گیلو و همکارانش (۲۰۰۷) در کشور نروژ توانستند پنج گروه خاک را در ۱۳ کلاس که بر اساس روش فائو رده‌بندی شده بودند شناسایی کنند. این پنج گروه خاک، در موقعیت‌های توپوگرافی مختلفی قرار داشتند و به‌طور چشمی همبستگی خوبی با نقشه خاکی که با روش‌های قدیمی تهیه شده بود، داشتند.

هنگل و همکاران (۲۰۱۵) در آفریقا با استفاده از داده‌های ۲۸۰۰۰ محل نمونه‌برداری، نقشه کربن آلی، pH، اجزا بافت خاک و ... را با بزرگنمایی ۲۵۰ متر با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و درختان تصمیم‌گیری تصادفی تهیه کردند. نتایج آنها نشان داد که روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی بهتر از روش رگرسیون خطی با میانگین ۱۵-۷۵ درصد کاهش خطا همراه بود.

در مطالعه‌ای ادیهکاری و همکاران (۲۰۱۴) توزیع عمودی کربن آلی خاک را در کشور دانمارک با استفاده از ۱۸ متغیر کمکی و با استفاده از تکنیک رگرسیون-کریجینگ مدل‌سازی کردند. آنها مشاهده کردند که روش به کار رفته دارای دقت قابل قبولی برای پیش-بینی کربن آلی خاک بخصوص در عمق‌های سطحی تر بود.

اکسوی و همکاران (۲۰۱۶) در سطح قاره اروپا، کربن آلی خاک سطحی را با استفاده از ۲۳۸۳۵ نمونه جمع‌آوری شده از سال‌های مختلف و با استفاده از تکنیک رگرسیون-کریجینگ مدل‌سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که روش مورد استفاده برای تهیه نقشه‌های با دقت قابل قبول موفق بوده است.

سری‌نیواس و همکاران (۲۰۱۶) کربن آلی و غیرآلی خاک را تا عمق یک متری در سراسر هندوستان با استفاده از ۱۱۹۸ نمونه خاک و استفاده از روش RF مدل-سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که ضریب تبیین برای کربن آلی و غیرآلی به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۶ بود. وایسه و لاگچری (۲۰۱۵) نقشه خصوصیات خاک مانند رس، شن، سیلت، کربن آلی خاک، pH و ظرفیت تبادل کاتیونی

همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش تصمیم‌گیری درختی و استفاده از ۱۷ متغیر محیطی کمکی و استفاده از ۱۱۷۰ پروفیل خاک، نقشه کلاس‌های خاک کشور دانمارک را تهیه کردند.

برونگارد^{۵۱} (۲۰۰۹) درختان تصمیم‌گیری تصادفی را برای پیش‌بینی مکانی کلاس‌ها و خصوصیات خاک استفاده کرد. وی دریافت که درختان تصمیم‌گیری تصادفی یک روش مفید برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک، خصوصیات خاک و توزیع پوشش گیاهی می‌باشد. گریم^{۵۲} و همکاران (۲۰۰۸) درختان تصمیم‌گیری تصادفی را برای پیش‌بینی و منشاء کربن آلی خاک در محیط تروپیکال استفاده کردند. آنها دریافتند که درختان تصمیم‌گیری تصادفی یک ابزار نیرومند برای تخمین مکانی و درک ارتباطات خاک-زمین نما است. لایب و همکاران (۲۰۱۲) درختان تصمیم‌گیری تصادفی و درخت رگرسیون را برای پیش‌بینی توزیع بافت خاک استفاده کرده و مشاهده کردند که روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی دارای دقت بالاتری نسبت به روش درخت رگرسیون بود.

مارچتی و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعه تخمین تیپ‌های خاک در ایتالیا مشاهده کردند که روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای، یک روش تخمین سریع و قابل اعتماد برای متغیرهای اسمی^{۵۳} مثل کلاس‌های خاک می‌باشد. آنها اظهار داشتند که این روش، نقشه‌های دقیق‌تری تولید نموده و امکان ارائه دقت تخمین نیز وجود دارد که با روش‌های معمول نقشه‌برداری خاک ارائه آن غیر ممکن می‌باشد. عبدالکادر^{۵۴} (۲۰۱۱) با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و نقشه‌های سنتی، برای مدل‌سازی ارتباط بین واحدهای نقشه خاک، خصوصیات توپوگرافی و خصوصیات طیفی از روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای در مصر استفاده کرد. وی مشاهده کرد که روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای، کلاس‌های خاک را با دقت کلی^{۵۵}

⁵¹Brungard

⁵²Grimm

⁵³Categorical

⁵⁴Abdel-Kader

⁵⁵Overall accuracy

خاک را در فرانسه در سطح ۲۷۲۳۶ کیلومتر مربع با استفاده از ۲۰۲۴ محل نمونه برداری با چهار روش مختلف مدل سازی نموده و مشاهده کردند که روش RF دارای دقت بیشتری نسبت به سایر روش ها بود. مدل رقومی ارتفاع در مطالعه آنها دارای بزرگنمایی ۹۰ متر بود.

راسل و بیوی (۲۰۱۶) نقشه فسفر کل خاک های استرالیا را در عمق ۳۰-۰ سانتیمتر در اندازه پیکسل های ۹۰ متر با استفاده از روش کویست- کریجینگ تهیه کردند. آنها بیان کردند که دقت تخمین تقریباً قابل اعتماد است.

سوماراتنا و همکاران (۲۰۱۶) در استرالیا در سطح ۸۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع کربن آلی خاک را با چهار روش رگرسیون خطی چندگانه^{۶۶}، درخت رگرسیون، کویست^{۶۷} و رگرسیون بردار پشتیبان در چهار عمق جداگانه مدل سازی کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل رگرسیون بردار پشتیبان اجرای بهتری نسبت به مدل های دیگر در همه عمق ها داشت. ملون و همکاران (۲۰۱۷) نقشه برداری رقومی کربن آلی خاک در مقیاس مزرعه را با ریزمقیاس سازی از پیکسل های ۱۰۰ متری به پیکسل های ۱۰ متری و با بکارگیری مشاهدات میدانی انجام دادند و مشاهده کردند که بکارگیری مشاهدات میدانی ضریب همبستگی را از ۰/۲ به ۰/۸ افزایش داد.

به روز رسانی نقشه های خاک

برخی محققان با بهره گیری از نقشه برداری رقومی خاک، نقشه های قدیمی خاک را به روز رسانی کرده اند. کمپن و همکاران (۲۰۰۹) روش رگرسیون منطقی چند جمله ای را برای به روز کردن نقشه های خاک با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ در هلند با استفاده از داده های نمونه های خاک و داده های کمکی محیطی استفاده کردند. دقت نقشه های بدست آمده که با نقاط اعتبارسنجی بررسی شد، ۵۸ درصد بود که دقت آن شش درصد بیشتر از نقشه موجود (قدیمی) بود. کمپن و همکاران (۲۰۱۲) در مقایسه

روش های نقشه برداری مرسوم و نقشه برداری رقومی با روش^{۵۸} (GLGM) برای به روز کردن نقشه های خاک قدیمی، مشاهده کردند که دقت روش نقشه برداری رقومی مانند روش نقشه برداری مرسوم بوده، اما هزینه های صرف شده ۳۰ درصد هزینه روش نقشه برداری معمول (قدیمی) بوده است. آنها مشاهده کردند که با کاهش تعداد نمونه در واحد سطح حتی دقت نقشه افزایش پیدا کرد. وی در این تحقیق نشان داد که با ۰/۳ نمونه در هکتار مقدار دقت نقشه با روش معمول ۵۵/۷ و با روش نقشه برداری رقومی ۵۴/۹ درصد بود. وقتی تعداد نمونه در نقشه برداری رقومی به ۰/۱۲ کاهش یافت. دقت ۶۱/۶ درصد بود و با ۰/۰۸ نمونه در هکتار به ۵۸/۵ درصد و با ۰/۰۴ درصد نمونه در هکتار دقت نقشه ۵۵/۸ درصد بود. دقت نقشه با ۰/۰۴ نمونه در هکتار معادل دقت نقشه با ۰/۳ نمونه در هکتار بود، ولی هزینه ۳۰ درصد کاهش یافت. یانگ و همکاران (۲۰۱۱) نقشه های قدیمی خاک را با استفاده از روش سولیم^{۵۹} در خاکهای کانادا و با تعداد کمی نمونه خاک به روز کردند و نشان دادند که نقشه های به روز شده با این روش دارای دقت بالاتری از نقشه های سنتی بودند. لی^{۶۰} و همکاران (۲۰۱۳) روش^{۶۱} Co-MCSS را برای به روز کردن نقشه های خاک استفاده کردند و مشاهده کردند که این روش دقت نقشه تولیدی را با داده های محدود افزایش داده است. سابارایالو^{۶۲} و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که کسب اطلاعات از نقشه های خاک موجود می تواند مفید باشد و در به روز کردن نقشه های خاک مورد استفاده قرار گیرد.

روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین شرطی

نقشه برداری رقومی خاک همچنین برای انتخاب محل نمونه برداری استفاده می شود. یکی از روش های

⁵⁸ Generalized Linear Geostatistical Model

⁵⁹ Solim

⁶⁰ Li

⁶¹ Cosimulation-Markov chain sequential simulation

⁶² Subburayalu

⁵⁶ Multiple linear regression

⁵⁷ Cubist

کاملی از خاک دارند و مناطقی که دارای اطلاعات کم یا فاقد اطلاعات هستند شروع می‌شود. سپس محدوده مناطق دهنده و گیرنده اطلاعات مشخص می‌شوند و شاخص شباهت‌های تمامی متغیرهای محیطی در همه پیکسل‌های محاسبه می‌شود و پیکسل‌های مشابه شناسایی می‌شوند. برای ایجاد رابطه خاک سرزمین باید پارسل‌های خاک مناطق دهنده و گیرنده یا مجموعه پیکسل‌های یکنواخت را در مقیاسی تعریف شده با استفاده از متد رده‌بندی آبراه‌های استراهلر تا رده چهار یا پنج طبقه‌بندی کرده و اقدام به محاسبه شاخص‌های شباهت فاکتورهای خاک-سازي در پیکسل‌های مشابه کرد. ایجاد پایگاه اطلاعات مکانی از متغیرهای محیطی، برای یک محدوده بسیار بزرگ مثل قاره (ها) با اندازه پیکسل‌های یک در یک کیلومتر که نماینده کاملی از فاکتورهای خاک‌سازی باشند. با محاسبه فاصله تاکسونومیک یا شاخص شباهت گروه-های متغیری (مثل خصوصیات اقلیمی، خصوصیات ژئولوژی، خصوصیات توپوگرافی و خصوصیات سنی) بین مناطق دهنده و گیرنده، مناطق مشابه تعیین می‌شوند. متعاقب آن باید شاخص‌ها را برای فاکتورهای خاک‌سازی محاسبه نمود. لذا هوموکلایم، هومولیت، هوموکرون و هوموتوپ را محاسبه می‌نمائیم. می‌توان این فرآیند را با انتخاب شاخص شباهت به‌صورت سلسله مراتبی از مهمترین تا کم اهمیت‌ترین فاکتورها که برای مثال در داخل هومولیت‌ها، هوموکرون و در آن هوموتوپ‌ها را به-عنوان هوموسویل انتخاب نمائیم. با داشتن پایگاه داده‌ای برای منطقه دهنده می‌توان آن‌ها را با استفاده از مدل‌های تخمین (درخت رگرسیون یا درخت تصمیم) به داده‌های اطلاعات محیطی منطقه گیرنده ترکیب و برای منطقه گیرنده نقشه تولید نمود. تفاوت تخمین بین مناطق نیز میزان خطای تخمین را معین می‌نماید.

نقشه‌برداری رقومی در ایران

نقشه‌برداری رقومی خاک در ایران در اوایل دهه ۸۰ شمسی آغاز گردید و در حال حاضر سرعت رشد آن

نمونه‌برداری مورد استفاده در نقشه‌برداری رقومی خاک، روش نمونه‌برداری مکعب لاتین شرطی (cLHS⁶³) است (میناسنی و مک براتنی، ۲۰۰۶)، که روشی طبقه‌بندی شده⁶⁴ یا لایه‌ای است. روش کار cLHS به این صورت است که کاربر تصمیم می‌گیرد تعداد نمونه مشخصی را استفاده کند، این تکنیک، داده‌های متغیرهای محیطی را به همان تعداد نمونه‌های خواسته شده به صورت خوشه تقسیم می‌کند و یک نمونه تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه را طوری انتخاب می‌کند که شرط مربع لاتین را تامین کند و این شرط این است که در هر بعد a و b فقط یک نمونه وجود دارد. در روش‌های جاری نمونه‌برداری برای نقشه خاک، انتخاب محل نمونه-برداری به تصمیمات شخصی نقشه‌برداران بستگی دارد. میناسنی و مک براتنی (۲۰۰۷) روش cLHS را با روش نمونه‌برداری تصادفی ساده⁶⁵، نمونه‌برداری تصادفی طبقه-بندی شده و نمونه‌برداری هایپرکیوب لاتین مکانی⁶⁶ مقایسه کرده و مشاهده کردند که روش cLHS اکثراً⁶⁷ به طور دقیقی توزیع واقعی متغیرهای محیطی را نشان می‌دهد. مودلر و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که cLHS روش مناسبی برای بیان تغییرات خاک می‌باشد.

هوموسویلز⁶⁷

بسیاری از مناطق دنیا، دارای داده‌های کم یا فاقد داده مورد نیاز برای تهیه نقشه خاک می‌باشند. برای رفع این مشکل در بعد جهانی‌روش هوموسویل توسط مالوان و همکاران (۲۰۱۰) پیشنهاد شده است. در این روش از داده-های خاک و اطلاعات محیط منطقه‌ای شناخته‌شده برای تخمین داده‌ها و نقشه خاک مناطقی که فاقد آن‌ها می‌باشند استفاده شده است. انتقال اطلاعات خاک از منطقه نمونه به منطقه مورد نظر به صورت زیر انجام می‌شود. شناسایی و تهیه نقشه مناطقی که دارای اطلاعات محیطی و نقشه

⁶³Conditional Latin Hypercube Sampling

⁶⁴Stratified random sampling

⁶⁵Simple random sampling

⁶⁶Spatial Latin Hypercube sampling

⁶⁷Homosoils

افزایش یافته است. رشد انتشار مقالات با موضوع نقشه برداری رقومی خاک توسط محققان کشور در سال‌های اخیر در مجلات معتبر دنیا نظیر ژئودرما^{۶۸} و کاتنا^{۶۹} در مقایسه با تخصص‌های دیگر خاک افزایش بیشتری داشته است. می‌توان گفت اولین مطالعه نقشه برداری رقومی خاک مربوط به مطالعات خاک در کشور توسط هنگل و همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفت. آنها روش‌های مختلف میانجی‌بندی شامل طبقه‌بندی نظارت شده با استفاده از روش حداکثر احتمال^{۷۰}، رگرسیون منطقی چند جمله‌ای، رگرسیون- کریجینگ روی عضویت‌ها^{۷۱} و کلاسه‌بندی فواصل طبقه‌بندی^{۷۲} را برای تهیه نقشه بافت خاک و کلاس‌های خاک طبقه‌بندی جهانی (WRB^{۷۳}) در کل محدوده کشور با ۴۲۵۰ پروفیل ارزیابی کردند و از شش پارامتر خصوصیات اراضی و تصاویر ماهواره مودیس و ۱۷ واحد فیزیوگرافی به عنوان متغیر کمکی استفاده شدند. نتایج آنها نشان داد که روش رگرسیون- کریجینگ روی عضویت‌ها، دارای بهترین دقت تخمین بود. مروج (۱۳۹۰) روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای را برای تخمین کلاس‌های خاک در شرق استان تهران استفاده کردند و دقت تولید کننده ۳۲ تا ۹۵ درصد برای کلاس‌های خاک در سطح زیرگروه بزرگ مشاهده کرد. باقری بداغ‌آبادی و همکاران (۲۰۱۱) روش رج‌بندی (CCA^{۷۴}) را برای تعیین مهمترین متغیرهای نقشه رقومی ارتفاع جهت استفاده در نقشه برداری رقومی خاک بکار برده و مشاهده کردند که حداقل انحنای شیب و شاخص رسوب، مهمترین متغیرهای تاثیرگذار در توزیع سری خاک بودند. جعفری و همکاران (۲۰۱۲) روش رگرسیون منطقی دوتایی و رگرسیون منطقی چند جمله‌ای را با ۱۲۶ پروفیل در سطحی ۹۰۰۰۰ هکتار برای پیش‌بینی توزیع گروه‌های بزرگ در منطقه زرنند کرمان مورد استفاده قرار

دادند و مشاهده کردند که در منطقه مورد مطالعه رگرسیون منطقی چند جمله‌ای دقت بیشتری نسبت به روش رگرسیون منطقی دوتایی داشت. آنها مشاهده کردند که نقشه ژئومورفولوژی خاک به عنوان یک متغیر مهم در تخمین کلاس‌های خاک در منطقه مطالعاتی آنهاست. تقی-زاده مهرجردی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش نمونه برداری ابرمکعب لاتین شرطی (eLHS) در ارکان یزد مشاهده کردند که استفاده از روش مدل‌سازی درختی به همراه فواصل تاکسونومیک دارای روش قابل قبولی است. جعفری و همکاران (۲۰۱۳) دقت نقشه را در سطوح مختلف رده‌بندی با روش شبکه عصبی مصنوعی در استان کرمان را ارزیابی نموده و مشاهده کردند که بهترین سطح طبقه‌بندی برای نقشه برداری رقومی خاک، گروه بزرگ خاک می‌باشد. تقی‌زاده مهرجردی (۲۰۱۴) با استفاده از روش درخت رگرسیون نقشه شوری خاک در عمق‌های مختلف خاک منطقه اردکان یزد را تهیه کرده و دقت این روش را بین ۷۸ (عمق ۱۰-۱۰ سانتیمتر) تا ۱۱ درصد (عمق ۱۰۰-۶۰ سانتیمتر) مشاهده کردند.

جعفری و همکاران (۲۰۱۴) روش درختان رگرسیون بهبود یافته^{۷۵} را با استفاده از داده‌های کم برای تهیه در نواحی خشک استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این روش به عنوان روش قابل اعتماد می‌تواند برای تخمین کلاس‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد. پهلوان راد و همکاران (۱۳۹۳) درختان تصمیم‌گیری تصادفی^{۷۶} را برای تخمین کلاس‌های خاک در استان گلستان مورد استفاده قرار دادند در یافتند این روش قابل اعتماد بوده و با تعداد نمونه کم تخمین قابل قبول ارائه می‌دهد. پهلوان راد و همکاران (۲۰۱۴) از روش نمونه برداری روش نمونه برداری مکعب لاتین شرطی و مدل جهت به‌روز رسانی نقشه‌های خاک در استان گلستان استفاده کردند و مشاهده کردند که روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی می‌تواند برای به‌روز رسانی نقشه‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد. پهلوان راد و همکاران (۲۰۱۴) و رگرسیون

⁶⁸ Geoderma⁶⁹ Catena⁷⁰ Maximum likelihoods⁷¹ Regression-kriging on memberships⁷² Classification of taxonomic distances⁷³ World Reference

Base for Soil Resources

⁷⁴ Canonical Correspondence Analysis⁷⁵ boosted regression trees⁷⁶ Random forest

روش درختان رگرسیون دارای صحت و کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و شبکه عصبی مصنوعی بود.

رهیافت ترویجی

با توجه به دقت قابل قبول روش‌های نقشه برداری خاک، امکان ارزیابی عدم قطعیت نقشه‌های تولیدی، امکان تعیین متغیرهای محیطی مهم در تغییرات خاک و همچنین رشد سریع نقشه برداری رقومی خاک و تغییر از فاز تحقیق به فاز مدیریتی در سطح جهانی (مینازنی و مک‌براتی، ۲۰۱۶) لزوم توجه بیشتر مدیران اجراییه مقوله نقشه برداری رقومی خاک در کشور را می‌طلبد. ورود موسسه تحقیقات خاک و آب به عنوان متولی خاک کشور، با جدیت بیشتر به موضوع نقشه برداری رقومی خاک ضرورت داشته و علیرغم مغفول بودن این موضوع در سال‌های گذشته، خوشبختانه در یکی دو سال گذشته این موضوع مورد توجه قرار گرفته است. تهیه نقشه خصوصیات خاک بخصوص در مناطق دارای پستی و بلندی با روش نقشه برداری رقومی انجام شود. ایجاد کارگروه نقشه برداری رقومی خاک در انجمن علوم خاک ایران پیشنهاد می‌شود.

منطقی چند جمله‌ای برای به‌روزرسانی و تهیه نقشه کلاس‌های خاک در استان گلستان استفاده کردند و مشاهده کردند که روش درختان تصمیم‌گیری دارای دقت بالاتری بود. حمزه‌پور و همکاران (۱۳۹۴) با روش روش اتروپی حداکثر اریب عدم قطعیت مربوط به تخمین مرز تغییرات شوری خاک در دشت ارومیه را ارزیابی کردند و دریافتند که روش اتروپی حداکثر اریب از قدرت بلایی در تخمین عدم قطعیت همراه با پیشبینی مرز شوری خاک برخوردار است. پهلوان راد و همکاران (۲۰۱۶) دو روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی و رگرسیون منطقی چند جمله را برای تخمین کلاس‌های خاک و به‌روزرسانی نقشه‌های خاک در استان گلستان مقایسه کردند و مشاهده کردند که روش درختان تصمیم‌گیری تصادفی دارای دقت بالاتری است. تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) شش مدل شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون بردار حمایت^{۷۷}، همسایه نزدیکترین^{۷۸}، درختان تصمیم‌گیری تصادفی، درخت تصمیم و روش برنامه‌دهی ژنتیک برای تخمین کربن آلی خاک در منطقه بانه مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که روش شبکه عصبی مصنوعی بر روش‌های برتری داشت.

مصلح و همکاران (۲۰۱۶) چهار تکنیک شبکه عصبی مصنوعی، درخت رگرسیون توسعه‌یافته، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) و مدل خطی رگرسیون را برای تخمین خصوصیات خاک در مناطق با پستی و بلندی کم استفاده کردند. آنها مشاهده کردند که دقت مدل خطی تعمیم‌یافته برای تخمین اکثر خصوصیات خاک بیشتر بود. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) از روش‌های حداکثر اتروپی و درختان تصمیم‌گیری تصادفی را برای تهیه نقشه آب زیرزمینی استفاده کردند و هر دو را روش موثر در تخمین پتانسیل آب زیرزمینی یافتند. فاتحی و همکاران (۱۳۹۵) ریز-مقیاس‌سازی نقشه کربن آلی خاک از اندازه پیکسل ۵۰ متری به اندازه پیکسل ۱۰ متری را با استفاده از نقشه رقومی خاک در استان کرمانشاه انجام دادند و دریافتند که

⁷⁷ support vector regression

⁷⁸ K nearest neighbor

فهرست منابع

۱. پهلوان راد، م.، خرماالی، ف.، تومانیان، ن.، کیانی، ف و کمکی، چ.ق.، ۱۳۹۳. پهنه بندی رقومی واحدهای خاک با استفاده از مدل درختان تصمیم گیری تصادفی در استان گلستان. پژوهشهای حفاظت آب و خاک. جلد ۲۱. شماره ۶: ۷۳-۹۳
۲. تقی زاده مهرجردی، ر.، سرمدیان، ف.، امید، م.، تومانیان، ن.، روستا، م.، رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۲. ترکیب فاصله تاکسونومیکی خاکها و درخت تصمیم برای پیش بینی مکانی کلاسهای خاک در اردکان. دو فصلنامه علمی پژوهشی خشک بوم، جلد ۳ شماره ۲: ۳۹-۲۶.
۳. حمزه پور، ن.، کریمیان اقبال، م.، تومانیان، ن.، سکوتی اسکویی، ر.، بوگارت، پاتریک. ۱۳۹۴. ارزیابی عدم قطعیت مربوط به تخمین مرز تغییرات شوری خاک در دشت ارومیه با روش انتروپی حداکثر اربب. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. جلد پنجم، شماره دوم، ۱۳۱-۱۴۷.
۴. فاتحی، ش.، محمدی، ج.، صالحی، م. ح.، مومنی، ع.، تومانیان، ن.، جعفری، ا. ۱۳۹۵. ریزمقیاس سازی نقشه رقومی کربن آلی خاک. نشریه آب و خاک، جلد ۳۰، شماره مهر و آبان، ۱۱۵۷-۱۱۴۲.
۵. مروج، ک. ۱۳۹۰. تهیه نقشه رقومی خاک با استفاده از تجزیه و تحلیل های ژئومرفومتری در بخشی از حوضه آبخیز رودخانه جاجرود. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۷ صفحه.
6. Abdel-Kader, F. H., 2011. Digital soil mapping at pilot sites in the northwest coast of Egypt: A multinomial logistic regression approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 14: 29-41.
7. Adhikari, K., Hartemink, A.E., Minasny, B., Bou Kheir, R, Greve, M.B., Greve, M.H. 2014. Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark. *PLoS ONE* 9(8): e105519. doi:10.1371/journal.pone.0105519.
8. Adhikari, K., Minasny, B., Greve, B.G., and Greve, M.H. 2013. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*. 214-215:101-113.
9. Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 19 (6): 716-723.
10. Akramkhanov, A., Martius, C., Park, S.J., and Hendrickx, J.M. 2011. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. *Geoderma*. 163: 55-62.
11. Aksoy, E., Yigini, Y., Montanarella, L. 2016. Combining Soil Databases for Topsoil Organic Carbon Mapping in Europe. *PLoS ONE*. 11(3):e0152098. doi:10.1371/journal.pone.0152098
12. Anderson, K., and Croft, H. 2009. Remote sensing of soil surface properties. *Prog. In Phys. Geogr.* 33, 457-473. *Applications of Optical Remote Sensing*, Wiley, New York, pp. 491-526.
13. Bagheri Bodaghabadi, M., Salehi, M.H., Martínez-Casasnovas, J. A. Mohammadi, J., Toomanian, N. Esfandiarpour Borujeni, I., 2011. Using Canonical Correspondence Analysis (CCA) to identify the most important DEM attributes for digital soil mapping applications. *Catena*, 86: 66-74.
14. Behrens, T., Förster, H., Scholten, H.T., Steinrücken, U., Spies E., and Goldschmitt, M. 2005. Digital Soil Mapping using Artificial Neural Networks. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 168:21-33.

15. Brungard, C. W. 2009. Alternative Sampling and Analysis Methods for Digital Soil Mapping in Southwestern Utah. Thesis for Master of Science. Utah State University. USA.
16. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., and McDaniel, P.A. 2003. Soil Genesis and Classification – 5th edition. Iowa State Press, Ames Iowa.
17. Burrough, P.A., MacMillian, R.A., van Deusen, W., 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *European Journal of Soil Science*. 43:193–210.
18. Butler, B.E., 1964. Can pedology be rationalized? Australian Society of Soil Science. Publication No. 3. Canberra.
19. Dahlgren, R.A., Boettinger, J.L., Huntington, G.L., and Amundson, R.G. 1997. Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma*. 78(3-4): 207-236.
20. Debella-Gilo, M., and Etzelmüller, B. 2008. Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *Catena*. 77: 8-18.
21. Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*. 226: 113-129.
22. Grimm, R., Behrens, T., Marker, M., and Elsenbeer, H. 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using random forests analysis. *Geoderma*. 146(1-2): 102-113.
23. Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Shepherd K.D., Sila, A., MacMillan, R.A., Jesus, J.M.D., Tamene, L., Tondoh, J.E. 2015 Mapping Soil Properties of Africa at 250 m Resolution: Random Forests Significantly Improve Current Predictions. *PLoS ONE* 10(6): e0125814. doi:10.1371/journal.pone.0125814.
24. Hengl, T., Rossiter, D.G., and Husnjak, S., 2002. Mapping soil properties from an existing national soil data set using freely available ancillary data. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, August 14-21. Paper no. 1140.
25. Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Stein, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression kriging. *Geoderma*. 120: (1–2), 75–93.
26. Hengl, T., Toomanian, N., Reuter, H. I., and Malakouti, M. J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*. 140(4):417–427.
27. Hueng, R., Bulmer, C.B., Schmidt, M.G. 2014. Predictive soil parent material mapping at a regional-scale: A Random Forest approach. *Geoderma*. 214-215: 141-154.
28. Jafari, A., Ayoubi, S., Khademi, H., A., Finke, P.A., and Toomanian, N. 2013. Selection of a taxonomic level for soil mapping using diversity and map purity indices: A case study from an Iranian arid region. *Geomorphology*. 201: 86-97.
29. Jafari, A., Finke, P.A., Van de Wauw, J., Ayoubi, S., 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: 284-309.
30. Jafari, A., Khademi, H., Finke, P.A., Van de Wauw, J., Ayoubi, S., 2014. Spatial prediction of soil great groups by boosted regression trees using a limited point dataset in an arid region, southeastern Iran. *Geoderma*. 232-234, 148-163.

31. Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. McGraw-Hill, New York.
32. Jensen, J.R. 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3rd ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
33. Kempen, B. 2011. *Digital Soil Mapping in Man-dominated landscapes*. PhD thesis. Wageningen University. Wageningen. Netherland.
34. Kempen, B., Brus, D.J., Heuvelink, G.B.M., and Stoorvogel. J.J. 2009. Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. *Geoderma*. 151:311–326.
35. Kempen, B., Brus, D.J., Stoorvogel, J.J., Heuvelink, G.B.M., and de Vries, F. 2012. Efficiency Comparison of Conventional and Digital Soil Mapping for Updating Soil Maps. *Soil Science Society of American Journal*. 76:2097-2115.
36. Lagacherie, P., McBratney, A.B., 2006. Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Developments in Soil Science*. 3 –22.
37. Ließ, M., Glaser. B., and Huwe, B., 2012. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture comparison of regression tree and random forest models. *Groderma*. 170: 70-79.
38. Mallavan B.P., Minasny B., McBratney A.B., 2010. Homosoil, a Methodology for Quantitative Extrapolation of Soil Information across the Globe. IN: J.L. Boettinger et al. (eds.), *Digital Soil Mapping*, Progress in Soil Science 2, DOI 10.1007/978-90-481-8863-5_12, Springer Science+Business Media B.V. 2010.
39. Malone, B. P., Styc Q., Minasny, B., McBratney, A.B., 2017. Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale: A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data. *Geoderma*. 290:91-99.
40. Marchetti, A., Piccini, C., Santucci, S., Chiuchiarelli, I., and Francaviglia, R., 2011. Simulation of soil types in Teramo province (Central Italy) with terrain parameters and remote sensing data. *Catena*. 85: 267-273.
41. McBratney, A.B., de Gruijter, J.J., Brus, D.J., 1992. Spacial prediction and mapping of continuous soil classes. *Geoderma* 54:39–64.
42. McBratney, A.B., Mendonça Santos, and M.L., Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117: 3-52.
43. Minasny, B., and McBratney, A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*. 32(9):1378-1388.
44. Minasny, B., and McBratney, A.B., 2007. Latin hypercube sampling as a tool for digital soil mapping. P153-165. In: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital Soil Mapping: An introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam.
45. Minasny, B., McBratney, A.B., 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons, *Geoderma*. 264:301-311.
46. Moore, I.D., Ladson, A.R., and Grayson, R. 1993. Digital Terrain Modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*. 5:3-30.
47. Moran, C.J., and Bui, E.N. 2002. Spatial data mining for enhancing soil map modeling. *International Journal of Geographical Information Science*. 16:533-549.
48. Mosleh, Z., n Salehi, M.H., Jafari, A., Esfandiarpour Borujeni, I., Mehnatkesh, M. 2016. The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188-195.

49. Mudler, V.L., Bruin, S., and Schaepman, M.E. 2013. Representing major soil variability at regional scale by constrained Latin Hypercube Sampling of remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21:301-310.
50. Noller, J. 2010. Applying geochronology in predictive digital mapping of soils. In: Boettinger, J.L., Howell, D.W., Moore, A.C., Hartemink, A.E., Kienast-Brown, S. (Eds.), *Digital Soil Mapping: Bridging Research, Environmental Application, and Operation*. Springer, Dordrecht, the Netherlands, pp. 43-53.
51. Pahlavan-Rad, M.R., Khormali, F., Toomanian, N., Colby W. Brungard, C.W., Kiani, F., Komaki, C.B., and Bogaert P.. 2014. Mapping and Updating Soil Series Using Random Forest and Conditioned Latin Hypercube Sampling in the Loess Soils of Northern Iran. *Geoderma*. (232-234): 97-106.
52. Pahlavan-Rad, M.R., Khormali, F., Toomanian, N., Colby W. Brungard, C.W., Kiani, F., Komaki, C.B., and Bogaert P.,. 2016. Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran. *Geoderma*. 279: 141-148.
53. Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., Mellese, A.M., 2016. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: A case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137: 360-372.
54. Rivero, R.G., Grunwald, S., and Bruland, G.L. 2007. Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. *Geoderma*. 140: 428– 443.
55. Rossel, R.A.V., Bui, E.N. 2016. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. *Science of the Total Environment*. 542: 1040-1049.
56. Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., and Deering, D.W. 1974, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, Vol. 1*, 48-62.
57. Scull, P., Franklin, J., and Chadwick, O.A. 2005. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Ecological Modeling*. 181:1-15.
58. Somarathna, P.D.S.N., Malone, B.P., Minasny, B. 2016. Mapping soil organic carbon content over New South Wales, Australia using local regression kriging. *Geoderma Regional*. 7: 38-48.
59. Sommer, M., Gerke, H.H., Deumlich, D. 2008. Modelling soil landscape genesis a time splitl approach for hummocky agricultural landscapes. *Geoderma*. 145: 480–493.
60. Sreenivas, K., Dadhwal, V.K., Kumar, S., Harsha, G.S., Mitran, T., Sujatha., Janaki Rama Suresh, G., Fyze, M.A., Ravisankar, T, 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma*. 269: 160-173.
61. Stoorvogel, J.J., Kempen, B., Heuvelink, G.B.M., and de Bruin, S. 2009. Implementation and evaluation of existing knowledge for digital soil mapping in Senegal. *Geoderma*. 149: 169-170.
62. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., and Malone, B.P., 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*. 213: 15–28.
63. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K, 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.
64. Vaysse, K., Lagacherie, K. 2015. Evaluating Digital Soil Mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional*. 4: 20-30.

65. Wilson JP, Galant JC .2000. Terrain analysis: principles and applications. Wiley, New York
66. Yang, L., Jio, Y., Fahmy, S., Zhu, A.X., Hann, S., Burt, J.E., and Qi, F. 2011. Updating Conventional Soil Maps through Digital Soil Mapping. Soil Science Society of American Journal. 75:1044–1053.
67. Yaalon, D.H., 1975. Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be solved?Geoderma. 14: 189-205.