

ارزیابی و بررسی تعمیم‌پذیری مدل استنباطی خاک- سرزمین (SoLIM) در نقشه‌برداری رقومی خاک با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن

محسن باقری بداعآبادی^۱، محمدحسن صالحی^{*۱}، عیسی اسفندیارپور بروجنی^۲، جهانگرد محمدی^۱، علیرضا کریمی کارویه^۳ و نورایر تومنیان^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۵)

چکیده

کاربرد مدل‌های تغییرپذیری ناپیوسته در روش‌های ستی (مرسوم) شناسایی خاک، محدودیت‌هایی را برای مرزبندی واحدهای نقشه به همراه دارد. راه کارهای نوین ارایه شده برای غلبه بر این محدودیت‌ها (که به طور کلی، "نقشه‌برداری رقومی خاک" نامیده می‌شوند)، با بررسی تغییرات پیوسته خاک، تلاش می‌کنند براساس متغیرهای محیطی که به سادگی قابل دست‌یابی یا محاسبه هستند، کلاس‌های خاک یا با وزن‌گی‌های آن را پیش‌بینی کنند. پژوهش حاضر می‌کوشد تا با هدف تهیه نقشه خاک منطقه بروجن - استان چهارمحال و بختیاری - توسط مدل SoLIM و به کارگیری مدل رقومی ارتفاع و وزن‌گی‌های آن، گامی جدید در راستای تهیه نقشه‌های خاک بردارد. برای این منظور، ۱۸ وزن‌گی مختلف از مدل رقومی ارتفاع استخراج گردیدند و پس از پردازش اولیه، هفت وزن‌گی مهم‌تر انتخاب شدند. این وزن‌گی‌ها به همراه سه زیرگروه و هفت فامیل خاک غالب موجود در منطقه مطالعاتی (شامل ۴۱ خاکرخ از ۱۲۵ خاکرخ حفر شده در کل منطقه)، ماتریس داده‌های ورودی به مدل SoLIM را تشکیل دادند. نقشه‌های خاک فازی به دست آمده از SoLIM در سامانه اطلاعات جغرافیایی (نرم‌افزار آرک - جی‌آی‌اس) به نقشه چندگوشه‌ای پراکنش خاک‌ها تبدیل شدند. نتایج نشان داد که ترکیبات گوناگون و وزن‌گی‌های مدل رقومی ارتفاع در برآورد نوع خاک‌ها دقت متفاوتی دارند، و به طور کلی، دقت درون‌یابی‌ها حدود دو برابر دقت برون‌یابی‌ها هستند. هم‌چنین، مدل SoLIM در برآورد نوع واحدهای نقشه و خاک‌های موجود در آن، دقت قابل قبولی داشت؛ لیکن در برآورد مکان دقیق کلاس‌های خاک، از دقت چندانی برخوردار نبود. لزوم استفاده از اطلاعات بیشتر مانند نقشه‌های زمین‌شناسی و غیره، برای افزایش دقت این روش، پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نقشه خاک، مدل SoLIM، منطق فازی، نقشه‌برداری رقومی خاک، مدل رقومی ارتفاع

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

۳. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mehsalehi@yahoo.com

مقدمه

پیوسته تغییر می‌یابد. به همین دلیل، برخی از پژوهش‌گران اعتقاد دارند که عدم قطعیت زیاد در نقشه‌های ستی خاک (Traditional soil maps)، از کارآیی آن‌ها کاسته است (۱۴، ۱۳ و ۴). برخی دیگر، نقشه‌های ستی خاک را وسایلی ناکارآمد می‌دانند و نتوان بودن شناساگران یا نقشه‌برداران در انتقال و رساندن آشکار و صریح مدل‌های ذهنی خود را دلیل این ناکارآمدی بیان نموده‌اند (۸ و ۱۷). محدودیت‌های موجود برای شناسایی چندگوش‌های خاک و نقشه‌های حاصل، که ناشی از دیدگاه تغییرپذیری ناپیوسته به خاک است، شناساگران را بر آن داشت تا متناسب با پیشرفت‌های صورت‌گرفته در فناوری اطلاعات، در راستای استفاده از روش‌های نوین شناسایی خاک (که با نام کلی "نقشه‌برداری رقومی خاک" (Digital Soil Mapping; DSM

شناسایی خاک (Soil survey)، به عنوان روشی برای تعیین الگوی پراکنش خاک، توصیف و نمایش آن به شکل قابل فهم و تفسیر برای کاربران مختلف (۵)، پایه و اساس اطلاعات خاک برای مدل‌سازی‌های محیطی است. به طورکلی، دو دیدگاه نسبت به تغییرپذیری خاک وجود دارد که شامل "مدل تغییرپذیری ناپیوسته" (Discrete Model of Spatial Variation; DMSV) و "مدل تغییرپذیری پیوسته" (Continuous Model of Spatial Variation; CMSV) است. براساس این دو دیدگاه می‌توان شناسایی و یا نقشه‌برداری خاک را به دو شیوه ناپیوسته و پیوسته تقسیم کرد. این دو مدل، از طریق دو روش کلی زیر قابل انجام می‌باشند:

۱. شناسایی چندگوش‌های خاک (Polygonal soil survey) این مطالعه بر مبنای مفهوم مدل خاک-زمین‌نمای یعنی (۱۰) استوار می‌باشد. (سال ۱۹۴۱) با به کارگیری مدل زیر، خاک را دستاورده برهمنکش عوامل خاک‌ساز معرفی نموده است:

$$S = f(Cl, O, R, P, T) \quad [1]$$

که S ، O ، R ، P و T به ترتیب، نشان‌گر آب و هوا یا اقلیم، موجودات زنده، ناهمواری‌ها، مواد مادری و زمان می‌باشند (۹). در شناسایی چندگوش‌های، برای نشان دادن انواع خاک‌ها و پراکنش آنها، گستره خاک به واحدهای همگن‌تر تفکیک می‌گردد. این کار با کشیدن مرزهایی که نقشه‌بردار پیش‌بینی نموده است، انجام می‌پذیرد. در طی این فرآیند، در کنار طبقه‌بندی و جداسازی واحدهای، تعمیم ویژگی‌های خاک نیز رخ می‌دهد؛ چرا که مشاهدات به طبقاتی تقسیم می‌شوند و یکی از آنها (منظور، خاک‌رخ شاهد) برای هر واحد، مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۷). بنابراین، به طور معمول، این نقشه‌ها و یا واحدهای استخراج شده از آنها، در تشریح ساختار خصوصیات پیوسته (سیمای سرزمین) (Landscape Continuum) نتوان می‌باشند (۱۶)؛ چرا که در جهان واقعی (Reality)، خاک در طول یک سیمای سرزمین و هماهنگ با تغییرات ارتفاعی، به صورت

۲. نقشه‌برداری رقومی خاک
این روش، بیان‌گر مجموعه‌ای از محاسبات رایانه‌ای برای پیش‌بینی پراکنش خاک‌ها در سیمای سرزمین می‌باشد و همگام با پیشرفت‌های به وجود آمده در پردازش اطلاعات، تکامل یافته است (۸). در نقشه‌برداری رقومی خاک، با استفاده از مدل‌های مختلف خاک-سیمای سرزمین (Soil-landscape models) اقدام به ساده‌سازی پیچیدگی‌های موجود در سامانه طبیعی خاک می‌شود. در واقع، مدل‌های مزبور، نشان‌دهنده شکل ساده‌شده‌ای از روابط پیچیده موجود بین خاک و شکل سرزمین (Landform) می‌باشند (۷). یکی از مهم‌ترین مدل‌هایی که به منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در روش‌های ستی شناسایی خاک ارایه شده است، مدل استنباطی خاک-سرزمین (SoIL-Land Inference Model; SoLIM) می‌باشد (۱۶). مطالعات ژو و همکاران (۱۹ و ۲۰) نشان داد که نقشه‌های تهیه شده توسط مدل SoLIM، نسبت به نقشه‌های حاصل از روش ستی شناسایی خاک، از صحت عمومی بالاتری برخوردار می‌باشند. از طرفی، برآوردهای انجام‌شده برای ویژگی‌های خاک نیز نشان‌گر دقیق‌تر مدل SoLIM، نسبت به روش‌های

(Mesic) می‌باشند. سیمای سرزمین در این منطقه، شامل اراضی تپه‌ماهوری (Hill-land) و دامنه (Piedmont) می‌باشد.

۲. نمونه‌برداری خاک و مطالعات آزمایشگاهی
اطلاعات خاک جمع‌آوری شده از منطقه مطالعاتی، شامل دو مجموعه داده مختلف می‌باشند. مجموعه اول، شامل اطلاعات حاصل از تشریح، نمونه‌برداری و نتایج فیزیکی و شیمیایی تعداد ۱۰۵ خاکرخ در منطقه بروجن می‌باشند که اسفندیارپور بروجنی (۱) براساس اصول روش ژئودلولوژی و در قالب تعیین دو منطقه نمونه (Sample area) و منطقه تعمیم (Validation area)، که در این مقاله، تحت عنوان منطقه تعمیم ۱ (شکل ۱) به آن اشاره شده، جمع‌آوری نموده است. مجموعه داده دوم، شامل اطلاعات حاصل از حفر، تشریح و نمونه‌برداری تعداد ۲۰ خاکرخ جدید با فواصل حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر می‌باشد که در این مقاله، منطقه تعمیم ۲ (شکل ۱) نامیده شده است. تمامی خاکرخ‌های حفر شده، براساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحراء تشریح شدند و از تمامی افق‌های ژنتیکی آنها نمونه‌برداری انجام گرفت. سپس، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی معمول براساس روش‌های استاندارد بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و در پایان، رده‌بندی تمامی خاکرخ‌ها تا سطح فامیل خاک، بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و مطابق با کلید رده‌بندی آمریکایی خاک (۱۴) نهایی گردید.

۳. تهیه داده‌های رقومی و پردازش آنها

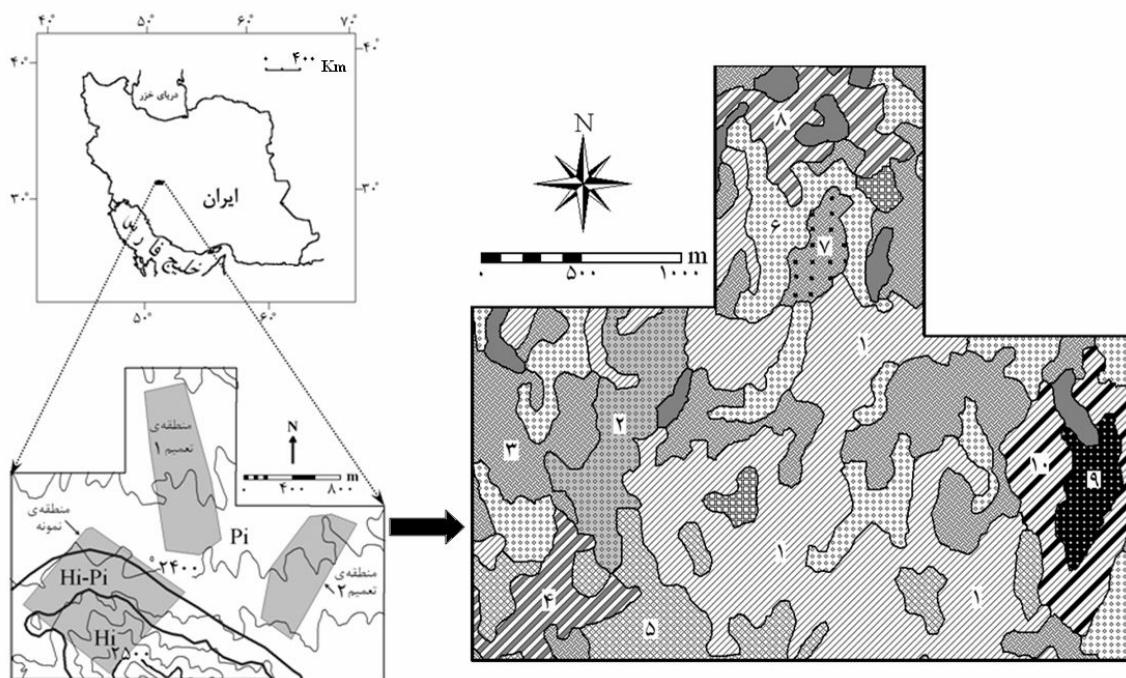
در این مرحله، با استفاده از DEM منطقه، با اندازه پیکسلی و دقیق ارتفاعی ۱۰ متر (۳) در محیط نرم‌افزار ایلویس (ILWIS3.4)، با نوشتن فرمان‌نامه‌های (Scripts) مورد نیاز و با استفاده از زیربرنامه‌های (Modules) تعریف شده استاندارد موجود در نرم‌افزار آرک- جی‌آی‌اس (Arc-GIS9.2)، مشتقات مختلف مرتبه‌های اول و دوم مدل رقومی ارتفاع (۱۵) تهیه شدند. این مشتقات (ویژگی‌ها)

مرسوم بوده‌اند. ژو و همکاران (۱۸) با مقایسه مدل SoLIM و روش سنتی شناسایی خاک، به‌منظور تخمین ضخامت افق A در منطقه کوهستانی غرب مانتانا، نتیجه گرفتند که مدل SoLIM برآوردهای بهتری از ضخامت افق A، نسبت به روش سنتی، در دسترس قرار می‌دهد؛ چرا که در این منطقه، میانگین واقعی مشاهده شده برای ضخامت افق A، برابر $15/49$ سانتی‌متر بود و برآوردهای مدل SoLIM و روش سنتی، به ترتیب، برابر $15/58$ و $14/39$ سانتی‌متر بودند. به طورکلی، در مناطقی که اطلاعات و دانش مناسبی از روابط خاک- سرزمین موجود باشد، مدل SoLIM برآوردهای قابل قبولی از ویژگی‌های خاک و سرزمین را در اختیار قرار می‌دهد. با وجود معایب روش‌های سنتی نقشه‌برداری خاک، به‌دلیل کاربرد ساده و آسان آنها، این روش‌ها هم‌چنان استفاده می‌شوند. از طرفی، در نقشه‌برداری رقومی خاک نیز همواره نوع خروجی یا نقشه‌های حاصل، مورد بحث بوده است و ارایه نتایج به صورت نقشه‌های چندگوش، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از آنجایی که نقشه‌های پستی و بلندی (Topographic maps) و مدل‌های رقومی ارتفاع (Digital Elevation Models; DEMs) گسترهای از ایران، پژوهش حاضر می‌کوشد تا با هدف تهیه نقشه خاک منطقه بروجن - استان چهارمحال و بختیاری- توسط مدل SoLIM و به کارگیری DEM و ویژگی‌های آن در نقشه‌برداری رقومی خاک، گامی جدید در راستای تهیه نقشه‌های خاک و ویژگی‌های آنها بردارد.

مواد و روش‌ها

۱. معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۱۰۰۰ هکتار در حد فاصل طول‌های جغرافیایی "۳۶/۴ ۳۶° ۱۲' ۵۱" ۲۵/۴ تا "۳۷/۳ ۳۷° ۵۶' ۴۷/۴ ۴۷° ۵۴' ۳۱" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۱۵' ۱۵" ۵۱° ۳۶/۴ تا " ۱۲' ۳۶° ۱۲" شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه مطالعاتی، به ترتیب، زریک (Xeric) و مزیک



شکل ۱. موقعیت کل منطقه مطالعاتی، منطقه نمونه و مناطق تعمیم (چپ) نقشه پایانی واحدهای پراکنش خاکها (راست) توجه: Pi: دامنه؛ Hi: حد واسط دامنه و اراضی تپه‌ماهوری؛ Hi-Pi: اراضی تپه‌ماهوری. راهنمای نقشه برای واحدهای شماره‌دار، در جدول (۳) ارایه شده است.

خاک غالب که حدود ۷۵ درصد پوشش خاکی منطقه مطالعاتی را شامل می‌شدند (جدول ۱)، انجام گرفت. با توجه به این‌که هدف از این پژوهش، بررسی تعمیم‌پذیری تنایع حاصل از SoLIM است، از بین ۹۰ خاک‌رخ موجود در منطقه نمونه، ۴۱ خاک‌رخ به طور تصادفی انتخاب گردیدند و نقشه‌ای جداگانه برای این خاک‌رخ‌ها در نرم‌افزار ایلویس تهیه شد و با به‌کارگیری عملیات تقاطع (Cross operation)، مقدار عددی هر یک از ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع برای هر یک از این ۴۱ خاک‌رخ بدست آمد. در این عملیات، برای هر خاک‌رخ، محدوده‌ای با شعاع ۱۵ متر در نظر گرفته شد تا بتوان توزیع آماری ویژگی‌های مورد نظر آنرا بدست آورد. از آنجایی که اندازه پیکسلی برای نقشه‌ها ۱۰ متر بود؛ بنابراین، محدوده هر خاک‌رخ، نه پیکسل را به خود اختصاص داد (لازم به ذکر است که اگر برای هر خاک‌رخ، تنها یک پیکسل متنظر شود، نمی‌توان ویژگی‌های آماری مربوطه را بدست آورد؛ چراکه یک عدد،

شامل درصد شیب، جهت شیب (زاویه و طبقه)، انواع خمیدگی (خمیدگی خالص (Curvature)، خمیدگی کمینه (Maximum curvature)، خمیدگی بیشینه (Minimum curvature)، خمیدگی تازه‌است (Tangent curvature)، خمیدگی نیم‌رخی (Planform Curvatur) و خمیدگی شکل سطح (Profile Curvature) جهت جریان (Flow direction)، تجمع جریان (Flow accumulation)، تابش مستقیم (Direct radiation)، تابش پخشیده (Direct duration)، تابش پخشیده مدت پخشیدگی (Area solar radiation)، تابش کل (Diffuse radiation)، شاخص قدرت جریان (Power index)، شاخص رسوب (Wetness index) و شاخص نمناکی (Sediment index) بودند (۱۵).

به‌منظور تسهیل در انجام محاسبات و با توجه به این‌که برخی از خاک‌رخ‌ها، فراوانی ناچیزی داشتند؛ این خاک‌رخ‌ها از نقشه اولیه حذف گردیدند و ادامه کار، تنها روی هفت فامیل

جدول ۱. رده‌بندی خاک‌های غالب منطقه مطالعاتی، به همراه فراوانی نسبی هر خاک

علامت فامیل	فامیل خاک (۱۴)	علامت زیرگروه	درصد نسبی
A	Clayey-skeletal, carbonatic, mesic Petrocalcic Calcixerpts	۱۱	PP
B	Fine, carbonatic, mesic Petrocalcic Calcixerpts	۱۱	PP
E	Fine, carbonatic, mesic Typic Calcixerpts	۱۰	TP
F	Fine, mixed, active, mesic Typic Calcixerpts	۱۰	TP
G	Fine-loamy, carbonatic, mesic Typic Calcixerpts	۱۱	TP
H	Loamy-skeletal, carbonatic, mesic Typic Calcixerpts	۱۰	TP
J	Fine, mixed, active, mesic Calcic Haploxeralfs	۱۲	CF

(Expert systems) نیز به کار گرفته می‌شوند. از طرفی، ویژگی‌های محیطی منطقه مورد نظر (مانند مدل رقومی ارتفاع و ویژگی‌های آن) در یک پایگاه داده‌های جغرافیایی (GIS data) نگهداری می‌شوند. یک موتور استنباط فازی به منظور ارتباط پایگاه دانش و پایگاه داده‌ها برای استخراج بردار تشابه خاک به کار می‌رود.

در پژوهش حاضر، پایگاه دانش براساس فراوانی نسبی ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع منطقه، برای هر خاک تعریف گردید. برای این منظور، با استفاده از دو ماتریس به دست آمده (فامیل خاک‌ها و زیرگروه خاک‌ها) در مرحله پیش (بند ۳)، توزیع هر ویژگی برای هر خاک (هیستوگرام ویژگی‌های خاک) در نرم‌افزار Knowledge Miner تهیه شد و پارامترهای مورد نیاز در پایگاه دانش، با توجه به هیستوگرام‌های حاصل تعریف گردیدند. در واقع، پایگاه دانش برای مدل SoLIM، یکبار براساس هفت فامیل خاک غالب منطقه و بار دیگر، بر مبنای سه زیرگروه غالب خاک (جدول ۱) و تنها با استفاده از داده‌های مربوط به ۴۱ خاک‌رخ منطقه نمونه در ماتریس‌های داده‌ها تعریف شدند. بدین ترتیب، ارزیابی نتایج به دو صورت زیر انجام پذیرفت:

۱. بررسی میزان دقیق تعمیم‌پذیری نتایج SoLIM از منطقه نمونه به دو منطقه تعمیم اشاره شده در بند ۲ (به عبارتی، بروندیابی نتایج حاصل از یک منطقه به مناطق دیگر). ۲. بررسی میزان دقیق نتایج SoLIM در منطقه نمونه (به عبارتی، در بروندیابی نتایج به ذکر است که در این مدل، سامانه‌های خبره

دارای توزیع آماری نمی‌باشد). در نتیجه، ماتریس داده‌ها شامل ۳۶۹ سطر (مربوط به پیکسل‌های ۴۱ خاک‌رخ؛ $41 \times 9 = 369$) و ۱۸ ستون (مربوط به مدل رقومی ارتفاع و ویژگی‌های آن) بود. تمامی مراحل بالا، برای سطح فامیل و سطح زیرگروه خاک انجام شدند و ماتریس‌های مربوطه، هم برای هفت فامیل غالب و هم سه زیرگروه غالب خاک موجود در منطقه مطالعاتی (جدول ۱) تهیه گردیدند.

۴. مدل استنباطی خاک- سرزمین (SoLIM)

مدل SoLIM بر مبنای یک فرآیند استنتاجی، روی مدل یعنی پایه‌ریزی شده است (۱۱ و ۱۷). این مدل، به‌طور ساده، به صورت زیر تعریف می‌شود:

[۲] $S = f(E)$ که در آن، S و E، به ترتیب، بیان‌گر خاک و متغیرهای محیطی هستند و ممکن است دهنده رابطه خاک- محیط (مدل خاک- سرزمین) می‌باشد (۱۱ و ۱۷). براساس این مدل، اگر ویژگی‌های محیطی و رابطه خاک- محیط، برای یک موقعیت شناخته شده باشند؛ آنگاه، خاک و یا ویژگی‌های آن در منطقه مورد نظر قابل استنتاج خواهند بود. به‌طور کلی، SoLIM با در نظر گرفتن محیط سازنده هر خاک و روابط خاک- سرزمین (که توسط اطلاعات خاک‌شناسان از منطقه مورد نظر تعریف می‌شوند)، اقدام به تشکیل یک پایگاه دانش (Knowledge base) می‌کند (لازم به ذکر است که در این مدل، سامانه‌های خبره

بودند. نقشه حاصل از مرحله قبل، در محیط نرم‌افزاری آرک-جی‌آی‌اس، به نقشه‌ای چندگوشه تبدیل گردید و واحدهای با مساحت کمتر از ۲/۳ هکتار، در واحدهای بزرگ‌تر ادغام شدند. عدد ۲/۳ هکتار، بیان‌گر کمترین مساحت قابل تفکیک براساس روش کرنل (Cornell) می‌باشد^(۶). نقشه چندگوشه‌ای حاصل، نقشه پایانی واحدهای خاک را به دست داد.

نتایج حاصل از خاک‌رخ‌های واقع در یک منطقه به دیگر خاک‌رخ‌های موجود در همان منطقه).

۵. تهیه اطلاعات از خروجی‌های به دست آمده از مدل SoLIM

مدل SoLIM در هر بار اجرا شدن، برای هر خاک، یک نقشه فازی با درجه عضویت صفر تا یک ارایه می‌کند؛ بنابراین، برای هفت فامیل خاک و سه زیرگروه خاک در هر بار اجرا شدن این مدل، به ترتیب، هفت و سه نقشه حاصل می‌گردند. برای شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع که در روش SoLIM بهتر می‌تواند خاک‌ها را برآورد کند، نخست، هر ویژگی مدل رقومی ارتفاع، به تنهایی وارد مدل شد. با توجه به این که مدل SoLIM ۱۸ بار اجرا گردید (برای ۱۸ ویژگی مدل رقومی ارتفاع)؛ برای هفت فامیل خاک و سه زیرگروه خاک، به ترتیب، تعداد ۱۲۶ (۱۸×۷=۱۲۶) و ۵۴ (۱۸×۳=۵۴) نقشه فازی به دست آمدند. برای هر نقشه خاک حاصل از یک ویژگی مدل رقومی ارتفاع، صحت عمومی نقشه‌ها (Overall map accuracy) (به بخش "۶" مراجعه شود) محاسبه شد. سپس، براساس صحت عمومی محاسبه شده، مهم‌ترین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع که برآورده بتری از خاک‌ها داشتند، انتخاب گردیدند. هفت ویژگی مهم‌تر شامل جهت شب (A)، انحنای نیمرخی (P)، مدت پخشیدگی (D)، درصد شب (S)، انحنای کمینه (M)، جهت جریان (F) و شاخص رسوب (Se) بودند (حروف داخل پرانتزها، به عنوان علامت اختصاری برای ویژگی‌های گفته شده انتخاب شده‌اند). در مرحله بعد، مدل SoLIM یکبار براساس ترکیبات مختلفی از این هفت ویژگی و بار دیگر بر مبنای هر هفت ویژگی اجرا شد. سپس، صحت عمومی نقشه‌های حاصل محاسبه شد و نقشه با بیشترین صحت عمومی، به عنوان نقشه مقدماتی واحدهای خاک انتخاب گردید. با اعمال فیلتر بیشینگی (Majority filter) (در محیط نرم‌افزاری ایلویس) بر روی نقشه انتخاب شده، اقدام به یکنواخت‌سازی پیکسل‌ها (خاک‌ها) ای با فراوانی بیشتر شد. لازم به ذکر است که تا این مرحله، تمامی نقشه‌های تولید شده به صورت نقشه‌های شبکه‌ای (Raster)

۶. ارزیابی نتایج

ارزیابی نتایج به دو صورت کمی و کیفی بررسی گردید. ارزیابی کمی نتایج نهایی مدل SoLIM، از طریق محاسبه صحت عمومی نقشه (OA) انجام گرفت. صحت عمومی نقشه، نشان‌دهنده آن است که چه تعداد از مشاهدات یا طبقات جداول، صحیح می‌باشند. به عبارت دیگر، چه اندازه از نمونه‌ها به درستی در طبقات مربوط جای گرفته‌اند. این ویژگی، به‌واسطه تشکیل ماتریس درهمی (Confusion matrix) و با توجه به فرمول زیر قابل محاسبه است (۱۰):

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad [۳]$$

که در آن، n و Z ، به ترتیب، بیان‌گر سطر A^m و ستون Z^m برای مشاهده X موجود در ماتریس درهمی می‌باشند. ارزیابی کیفی نتایج SoLIM، با نام‌گذاری واحدهای خاک نقشه پایانی انجام شد. برای این منظور، مساحت هر فامیل خاک در واحدهای نقشه خاک پایانی، یکبار براساس واقعیت منطقه (با استفاده از ۱۲۵ خاک‌رخ موجود) و بار دیگر، بر مبنای نقشه خاک حاصل از مدل SoLIM (نقشه حاصل از بند "۵") محاسبه شد (۲) و واحدهای خاک برای دو حالت گفته شده (واقعیت منطقه و مدل SoLIM)، طبق اصول نقشه‌برداری خاک نام‌گذاری شدند (۱۲). پس از این‌کار، نام واحدهای نقشه حاصل از SoLIM با واقعیت مقایسه شدند. بدین‌ترتیب، دقت مدل SoLIM در برآورد و پیش‌بینی واحدهای خاک (نه نوع خاک) تعیین گردید.

برابر افزایش یافته است. لازم به ذکر است که صحت برآوردهای خاک نیز در هر ترکیب متفاوت است؛ برای نمونه، در ترکیب ADMS، فامیل‌های A و B با صحتی حدود ۶۰ درصد، برآوردهای H و J با صحتی حدود ۲۲ و صفر بوده‌اند؛ در حالی که فامیل‌های H و J در این ترکیب، ۱۰۰ درصد نادرست برآورده است (به‌دلیل حجم زیاد داده‌ها، مقدار عددی برآوردها برای هر فامیل یا زیرگروه در هر ترکیب، نشان داده نشده است). از طرفی، در برخی از ترکیب‌ها، گاه یک فامیل به‌طورکلی برآورده نشده است و در نقشه به‌دست آمده، این فامیل مشاهده نمی‌شود. به عنوان مثال، نقشه خاک تهیه شده از ترکیب ADSeS، قادر به فامیل J بود.

متفاوت بودن صحت تخمین خاک‌ها در ترکیبات مختلف ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع، هرچند ممکن است که در ظاهر، یک عیب به‌نظر آید؛ اما گاهی می‌توان آنرا به عنوان یک مزیت برای روش SoLIM در نظر گرفت؛ چراکه بر این اساس می‌توان بهترین ترکیب را برای یک خاک خاص، تعیین نمود و با توجه به آن، با امکان بالاتر، محل حضور آن خاک را پیش‌بینی کرد. برای نمونه، اگر به دنبال خاکی با فامیل‌های A و B باشیم، همان‌طورکه گفته شد ترکیب ADMS با صحت حدود ۶۰ درصد، برآورده درستی از این فامیل‌ها دارد و شاید نیازی نباشد که تعداد بیشتری از ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع را برای این هدف استفاده نمود. به‌طورکلی، صحت‌های عمومی محاسبه شده در جدول ۲، نشان می‌دهند که برونی‌بایی انجام‌شده برای مناطق تعمیم و یا به عبارت بهتر، تعمیم نتایج منطقه نمونه به خارج از آن برای اشکال اراضی مشابه، از صحت ناچیزی برخوردار است. این مسئله می‌تواند با توجه به دلایل زیر قابل توجیه باشد:

۱. منطقه نمونه انتخاب شده، نماینده واقعی مناطق تعمیم نمی‌باشد. ۲. میزان تأثیر ویژگی‌های انتخاب شده از مدل رقومی ارتفاع براساس ۴۱ خاک‌رخ منطقه نمونه، متفاوت از مناطق تعمیم می‌باشد. به عبارت دیگر، در مناطق تعمیم، به احتمال

به‌طورکلی، در این پژوهش، ارزیابی نتایج (کمی و کیفی) به سه صورت زیر انجام پذیرفت:

۱. برای دو منطقه تعمیم: که در این حالت، دقت مدل SoLIM در بردن یابی نتایج ارزیابی شد. ۲. برای منطقه نمونه: که این کار با استفاده از خاک‌رخ‌هایی که وارد محاسبات نشده بودند (۴۹ خاک‌رخ باقی‌مانده از منطقه نمونه) انجام پذیرفت و بر این اساس، دقت مدل SoLIM در درون یابی نتایج، مورد آزمون قرار گرفت. ۳. با استفاده از تمام ۸۹ خاک‌رخ موجود در مناطق تعمیم و منطقه نمونه (خاک‌رخ‌های مربوط به هفت فامیل غالب خاک): که در این حالت، دقت کلی مدل SoLIM در پیش‌بینی و برآورده خاک‌ها به‌دست آمد.

نتایج و بحث

در جدول ۱، رده‌بندی هفت فامیل خاک غالب موجود در منطقه مطالعاتی به‌همراه درصد نسبی هر کدام آورده شده است. ملاحظه می‌گردد که این فامیل‌ها، حدود ۷۵ درصد از پوشش خاکی منطقه را شامل شده‌اند. از طرفی، جدول مزبور، نمایان گر این است که سه زیرگروه تیپیک کلسی‌زرپتز Petrocalcic، پتروکلسیک کلسی‌زرپتز (Typic Calcixerpts)، و کلسیک هاپلوزرالفز (Calcic Haploixeralfs)، زیرگروه‌های غالب منطقه می‌باشند. جدول ۲ مقادیر صحت عمومی را برای برخی از ترکیب‌های گوناگون حاصل از هفت ویژگی مدل رقومی ارتفاع (بند "۵") نشان می‌دهد (به‌دلیل تعداد و حجم زیاد ماتریس‌های درهمی، داده‌ها ارایه نشده‌اند). همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ صحت عمومی برای برونی‌بایی (بر مبنای خاک‌رخ‌های دو منطقه تعمیم)، درون یابی (براساس خاک‌رخ‌های منطقه نمونه) که وارد محاسبات نشده‌اند) و صحت کلی در برآورده نوع خاک‌ها (با لحاظ نمودن تمامی خاک‌رخ‌های حفرشده در کل منطقه مطالعاتی) در ترکیب‌های گوناگون حاصل از هفت ویژگی مدل رقومی ارتفاع، متفاوت می‌باشند و از روند خاصی پیروی نمی‌کنند. البته، صحت عمومی برای زیرگروه‌های خاک (نسبت به فامیل‌های خاک) تا حدود دو

جدول ۲. مقادیر درصد صحت عمومی برای برخی از ترکیب‌های حاصل از هفت ویژگی مدل رقومی ارتفاع

ترکیب ویژگی‌های مدل	صحت عمومی برای سطح زیرگروه خاک			صحت عمومی برای سطح فامیل خاک			تخمین کمتر از ۲۵ درصد	F و H
	دروزنیابی	برونیابی	کل	دروزنیابی	برونیابی	کل		
رقومی ارتفاع*								
ADMS	۱۶/۷	۴۱/۷	۳۸/۲	۳۳/۱	۸۱/۱	۷۷/۵	J و H	
ADMSeS	۱۶/۷	۳۷/۵	۳۷/۱	۳۴/۴	۷۵/۵	۷۳/۲	B	
ADSeS	۱۶/۷	۲۹/۲	۳۷/۱	۳۳/۱	۶۰/۲	۷۰/۲	J	
ADFSes	۲۰/۸	۲۹/۲	۳۹/۳	۳۹/۰	۵۹/۱	۷۹/۱	B و F	
ADFMSeS	۲۹/۲	۲۹/۲	۴۰/۵	۶۱/۱	۶۰/۲	۸۲/۲	F	
ADPS	۱۷/۰	۳۱/۳	۳۷/۱	۳۳/۵	۶۵/۰	۶۷/۰	E	
ADMPSes	۲۰/۲	۳۲/۴	۳۷/۱	۴۲/۴	۶۷/۲	۶۸/۱	B	
ADFMPSeS	۲۹/۲	۲۹/۲	۴۵/۵	۶۲/۱	۶۵/۲	۸۶/۸	-	

*: جهت شیب (A)، انحنای نیمرخی (P)، مدت پختگی (D)، درصد شیب (S)، انحنای کمینه (M)، جهت جریان (F) و شاخص رسوب (Se)

مطالعاتی در این سطح می‌باشد. شکل ۱ (راست) نقشهٔ پایانی واحدهای پراکنش خاک‌ها برای کل منطقهٔ مطالعاتی را نشان می‌دهد. نام برخی از واحدهای این نقشه برای دو سطح رده‌بندی زیرگروه و فامیل خاک در جدول ۳ آورده شده‌اند. در این جدول، فامیل‌هایی (حداکثر چهار فامیل خاک) که دارای بیشترین مساحت در هر واحد خاک می‌باشند، نیز ارایه شده‌اند. به‌منظور بررسی و مقایسه نتایج SoLIM با واقعیت صحراء (از نظر نام واحد خاک، نه نوع خاک)، نام‌گذاری واحدهای نقشه، یکبار براساس واقعیت منطقه (با ۱۲۵ خاک‌رخ موجود) و یکبار هم بر مبنای نقشهٔ حاصل از مدل SoLIM (نقشهٔ حاصل از بند "۵") انجام شد. در اینجا، مقایسه‌ای کیفی برای نوع و نام واحدهای نقشه صورت گرفت؛ صرف نظر از این‌که نوع خاک (فامیل یا زیرگروه) در هر واحد، با چه صحتی برآورد شده است.

برای نمونه، واحد شماره ۵ در واقعیت صحرایی، "اجتماع G و F" و در SoLIM "اجتماع H و G" نام دارد. هرچند در واقعیت، فامیل خاک A نیز در این واحد، دارای مساحت قابل توجهی می‌باشد؛ ولی طبق اصول نام‌گذاری واحدهای خاک و با در نظر گرفتن مفهوم خاک‌های مشابه (Similar soils) و

زیاد، ویژگی‌های دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. ۳. این احتمال وجود دارد که هر کدام از مناطق تعیین و یا نمونه، پیش از این، تحت فرآیندهای متفاوتی بوده‌اند که فرآیند جدیدتر، آنها را پوشانده است و امکان تفکیک فرآیندهای گذشته را از بین برده است.

افزایش بیشتر صحت عمومی برای منطقه نمونه (انجام درونیابی) را می‌توان ناشی از کارآیی بهتر مدل برای مناطق دارای اطلاعات بیشتر و یا تأثیرگذاری بهتر و مطلوب‌تر ویژگی‌های به کار رفته در مدل برای این منطقه دانست. بنابراین، می‌توان گفت برای استفاده از مدل SoLIM، بهتر است که از کل منطقه مورد نظر، اطلاعات به دست آورده وارد مدل نمود. با توجه به این موضوع و نظر به این‌که در روش مرسوم نقشه‌برداری خاک (روش فیزیوگرافی)، برخلاف روش ژئوپلوری، برای کل منطقه، نقاط مطالعاتی وجود دارد، می‌توان انتظار داشت که روش SoLIM در بهبود و ارتقای نقشه‌های موجود (که براساس روش مرسوم تهیه شده‌اند) مفید واقع شود. علاوه بر این، افزایش قابل توجه صحت عمومی برای سطح زیرگروه، حاکی از کارآیی قابل قبول مدل SoLIM و ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در برآورد خاک‌های منطقه

جدول ۳. مقایسه اسامی واحدهای خاک تفکیک شده برای منطقه مطالعاتی، براساس برآورد مدل SoLIM و واقعیت صحراوی در دو سطح زیرگروه و فامیل خاک

		فامیل خاک				زیرگروه			
		واقعیت صحراوی		SoLIM		واقعیت صحراوی		SoLIM	
منطقه نحوه	نوع فamیل	نام واحد (فamیل) فamیل های غالب*	نام واحد (فamیل) فamیل های غالب*	نام واحد (فamیل)	نام واحد (زیرگروه)				
منطقه نحوه	۱	B G E و H,B,G,E	A و B	اجتماع G, A و H	اجتماع H,B,A,G	PP و TP	اجتماع	TP	اجتماع PP و
	۲	A B F و J,A,B,F	J و H	اجتماع E, J و H	A,H,J,E	PP و TP	اجتماع	CF	CF و PP
	۳	F,X,J و F,J,X	E و F	کمپلکس J, X و F	G,E,F,J	TP و CF	کمپلکس	TP	CF و
	۴	G,X,B و G,X,B	B و H	اجتماع G, B و H	J,B,H,G	PP و TP	اجتماع	PP	اجتماع و
	۵	G,F,H و A,G,F,H	G و H	اجتماع G, H و A	A,E,G,H	TP	خاک	TP	خاک
منطقه نحوه	۶	J و B,J,A	J و G	اجتماع E, J و G	A,G,J,E	CF و TP	اجتماع	CF	اجتماع و
	۷	A,J,X و G,A,J,X	F و E	اجتماع J, X و F	G,F,E,J	TP و CF	اجتماع	TP	CF و
	۸	J و B,J	J	اجتماع B, J و J	F,J,G	CF و TP	اجتماع	CF	اجتماع و
منطقه نحوه	۹	E,J و G,A,E,J	J و E	کمپلکس J, E و G,A	G,H,J,E	TP و CF	کمپلکس	CF	کمپلکس و
	۱۰	G,F,E و X,G,F,E	E	اجتماع G, E و X,G,F,E	H,J,E,G	TP	خاک	TP	خاک

*: مساحت خاک‌های غالب موجود در هر واحد، از سمت راست به چپ کاهش می‌یابد.

علامت X در نام برخی از واحدها، نشان‌گر فامیل‌هایی غیر از هفت فامیل غالب خاک موجود در منطقه مطالعاتی است.

تیپیک کلسوی زرپترز" برآورده است. هرچند مدل SoLIM در نام‌گذاری واحدهای پراکنش خاک براساس سطح زیرگروه، از کارآیی بالاتری برخوردار می‌باشد (جدول ۳)، لیکن در سطح فامیل نیز دقت خوبی دارد و مقایسه نام واحدها بین روش SoLIM و واقعیت منطقه، نشان‌گر آن است که در بیشتر موارد، یک یا دو خاک، به درستی در نام واحد مربوطه قرار گرفته‌اند (جدول ۳).

به علاوه، توجه به ستون خاک‌های غالبی که توسط SoLIM برآورده شده‌اند و خاک‌های غالبی که در واقعیت منطقه وجود دارند، نشان‌دهنده پیش‌بینی درست مدل SoLIM در این رابطه می‌باشد. این موضوع، حتی در مورد برون‌یابی‌های انجام‌شده برای مناطق تعمیم نیز صادق است (جدول ۳). به عبارت دیگر،

غیر مشابه (Non-similar soils) (۱۲)، در نام این واحد وارد نمی‌شود. به علاوه، در SoLIM نیز دو خاک E و A دارای مساحت قابل توجهی هستند؛ ولی در نام واحد مذکور وارد نشده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود؛ SoLIM به خوبی توانسته است که نوع واحد خاک (که در اینجا منظور، واحد اجتماع (Association) است) را همانند واقعیت برآورده کند و نیز دو خاک (خاک‌های H و G) از سه خاک اصلی موجود در نام واحد خاک را هم ارایه نماید. علاوه بر این، SoLIM وجود خاک A را هم در این واحد برآورده است. هم‌چنین، در نام‌گذاری واحد ۵ براساس سطح زیرگروه، مشاهده می‌گردد که نتیجه روش SoLIM با واقعیت صحرا، یکسان است و واحد خاک مذبور را از نوع همگون (Consociation) با نام "خاک

برون یابی نوع خاک، برآورده درستی را در سطح زیرگروه خاک به ارمنغان آورد. مقدار این صحت عمومی، به ترکیب‌های مختلف ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع بستگی دارد.

۲. به کارگیری ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در مدل استنباطی خاک-سربزمین (مدل SoLIM)، هرچند که نتایج چندان قابل قبولی را در سطح فامیل ارایه نکرد؛ اما این انتظار وجود دارد که استفاده از ویژگی‌های بیشتر، داده‌های ورودی دیگر (به عنوان مثال، استفاده از نقشه‌های ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی) و نیز کاربرد مدل رقومی ارتفاع با دقت بالاتر (دقیق بیش از ۱۰ متر) می‌تواند نتایج را بهبود بخشد.

۳. مدل SoLIM به خوبی می‌تواند برآورده درستی از نوع و نام واحدهای خاک، حتی در بروند یابی، داشته باشد. به عبارت بهتر، تعمیم‌پذیری نتایج SoLIM هرچند که در تعیین نوع خاک (در سطح فامیل)، دارای صحت پایینی است؛ لیکن برای نام‌گذاری واحدهای خاک، دقت قابل قبولی دارد.

۴. به منظور افزایش کارآیی مدل SoLIM، بهتر است که از کل منطقه مطالعاتی، اطلاعات به دست آورد و وارد مدل نمود. هم‌چنین، علاوه‌بر مشاهدات صحراوی، استفاده از نظرات افراد کارشناس در تعریف توابع عضویت فازی برای مدل SoLIM بهویژه در موقعی که نمونه‌های موجود کافی نیستند و یا نماینده خوبی برای معرفی منطقه مورد نظر نمی‌باشند، می‌تواند کارگشای باشد.

۵. ابراههای مطالعاتی با ماهیت پیوسته (مانند تصاویر ماهواره‌ای و یا مدل رقومی ارتفاع) می‌توانند در شناسایی تغییرپذیری تدریجی پدیده‌های طبیعی (مانند خاک)، نقش مؤثری داشته باشند. بنابراین، استفاده از مدل رقومی ارتفاع و ویژگی‌های آن به همراه اطلاعات دیگر (مانند تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین‌شناسی و غیره)، به منظور بررسی ارتقای کیفی نقشه‌های خاک قدیمی و به هنگام کردن آنها پیشنهاد می‌شود.

هرچند این مدل در برآورده مکان دقیق خاک‌ها در سطح فامیل، دارای صحت پایینی است (جدول ۲)؛ لیکن در برآورده وجود خاک‌های مختلف در واحدهای خاک، دقت قابل قبولی را نشان می‌دهد (جدول ۳). البته باستی توجه داشت که صحت پایین SoLIM در برآورده مکان دقیق خاک‌ها در سطح فامیل، مدل SoLIM (بدین معنی که این آن نمی‌باشد؛ چراکه این برآوردها تنها براساس ویژگی‌های DEM (به عنوان یکی از پنج عامل خاک‌ساز) انجام شده‌اند. به طورکلی، می‌توان گفت که روش SoLIM در برآورده نوع واحدهای نقشه و موقعیت مکانی خاک‌های موجود در آنها از صحت قابل قبولی برخوردار است. در عمل، باستی توجه داشت که نقشه حاصل (شکل ۱- راست)، پراکنش خاک‌ها را بر مبنای ویژگی‌های استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع نشان می‌دهد. برای این‌که بتوان این نقشه را به نقشه خاکی تبدیل نمود که از نظر مدیریتی هم کارآیی لازم را دارا باشد، نیاز به اطلاعات تکمیلی بیشتر (مانند اطلاعات مربوط به مواد مادری، فیزیوگرافی و غیره) است که خوشبختانه این اطلاعات در گزارش‌ها و نقشه‌های خاک سنتی وجود دارند.

نتیجه‌گیری

۱. ویژگی‌های مختلف مدل رقومی ارتفاع (هم به لحاظ منطقی و ریاضی، و هم از نظر تجربی)، دارای رابطه نزدیکی با ویژگی‌های محیطی و خاک هستند. استفاده از این ویژگی‌ها در شناسایی خاک می‌تواند تا حد زیادی بر دقت کار بیفزاید و از صرف هزینه و زمان بکاهد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنها با استفاده از هفت ویژگی مدل رقومی ارتفاع (بدون کاربرد هیچ‌گونه اطلاعات دیگر) می‌توان با صحت عمومی حدود ۸۱ درصد در درون یابی و با صحت کلی حدود ۶۰ درصد در

منابع مورد استفاده

۱. اسفندیارپور بروجنی، ع. ۱۳۸۸. تعمیم‌پذیری روش ژئوپدولوژی در نقشه‌برداری خاک. پایان‌نامه دکتری خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲. باقری بداعآبادی، م. و م.ح. صالحی. ۱۳۸۸. کاربرد سطح مؤثر نیمرخ خاک برای تعیین خلوص واحدهای نقشه خاک. یازدهمین کنگره علوم خاک ایران، گرگان.

۳. سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۷. تهران. ایران (<http://www.ncc.org.ir>)

4. Boruvka, L., J. Kozak, J. Nemek and V. Penizec. 2002. New approach to the exploitation of former soil survey data. 17th world congress of soil science, Bangkok, Thailand, August 14- 21 2002. Paper No: 1682.
5. Bouma, J., H.W.G. Bootink and P.A. Fink 1996. Use of soil survey data for modeling solute transport in the Vadose zone. *J. Environ. Quality* 25: 519 – 529.
6. Dent, D. and A. Young. 1981. Soil Survey and Land Evaluation. George Allen & Unwin, London, England.
7. Forbes, T.R., D. Rossiter and A. Van Wambeke. 1982. Guidelines for evaluating the adequacy of soil resource inventories. 1987 printing ed. SMSS Technical Monograph #4. Ithaca, NY: Cornell University Department of Agronomy. 51.
8. Grunwald, S. 2006. Environmental Soil-landscape Modeling, Geomorphic Information Technologies and Pedometrics. Taylor and Francis Pub., USA.
9. Hewitt, A.E. 1993. Predictive modeling in soil survey. *Soils and Fertil.* 56: 305-314.
10. Jenny, H. 1941. Factors of soil formation – a system of quantitative pedology. Dover Publications, New York, 281 pp.
11. Legros, J.P. 2006. Mapping of the Soil. Science Pub., NH, USA.
12. Shi, X., A.X. Zhu, J.E. Burt, F. Qi and D. Simonson 2004. A case base reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Sc. Soc. Amer. J.* 68: 885-894.
13. Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. United States Department of Agriculture, Handbook No. 18, Washington DC, USA.
14. Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy. 11th ed., NRCS, USDA, USA.
15. Webb, T.H. and L.R. Lilburne. 2005. Consequence of soil map unit uncertainty on environmental risk assessment. *Australian j. Soil Res.* 43: 119 – 126.
16. Willson, J.P. and J.C. Gallant. 2000. Terrain Analysis, Principles and Applications. John Wiley and Sons Inc., USA.
17. Zhu, A. 1997a. A similarity model for representing soil spatial information. *Geoderma* 77: 217-242.
18. Zhu, A., L. Band, B. Dutton and T.J. Nimlos. 1996. Automated soil inference under fuzzy logic. *Ecol. Model.* 90, 123–45.
19. Zhu A., L. Band, R. Vertessy and B. Dutton. 1997. Derivation of soil properties using a soil land inference model (SoLIM). *Soil Sci. Soc. of Amer. J.* 61.
20. Zhu, A., B. Hudson, J. Burt, K. Lubich and D. Simonson. 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic", *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 65: 1463-1472.