

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 تومانیان^۴

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

چکیده

کاربرد مدل‌های تغییرپذیری ناپیوسته در روش‌های سنتی (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 ویژگی‌های 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 ویژگی‌های آن، گامی جدید در راستای تهیه نقشه‌های خاک بردارد. برای این منظور، ۱۸ ویژگی مختلف از مدل رقومی ارتفاع استخراج گردیدند و پس از پردازش اولیه، هفت ویژگی مهم‌تر انتخاب شدند. این ویژگی‌ها به همراه سه زیرگروه و هفت فامیل خاک غالب موجود در منطقه مطالعاتی (شامل ۴۱ خاک رخ از ۱۲۵ خاک رخ 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 ویژگی‌های 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 ولی عصر (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

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 مدل سازی های محیطی است. به طور کلی، 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 می توان شناسایی و یا نقشه برداری خاک را به دو شیوه ناپیوسته و پیوسته تقسیم کرد. این دو مدل، از طریق دو روش کلی زیر قابل انجام می باشند:

۱. شناسایی چندگوشه ای خاک (Polygonal soil survey) این مطالعه بر مبنای مفهوم مدل خاک- زمین نمای ینی (۱۰) استوار می باشد. (سال ۱۹۴۱) با به کارگیری مدل زیر، خاک را دستاورد برهم کنش عوامل خاک ساز معرفی نموده است:

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

که CI، O، R، P و T، به ترتیب، نشان گر آب و هوا یا اقلیم، موجودات زنده، ناهموازی ها، مواد مادری و زمان می باشند (۹). در شناسایی چندگوشه ای، برای نشان دادن انواع خاک ها و پراکنش آنها، گستره خاک به واحدهای همگن تر تفکیک می گردد. این کار با کشیدن مرزهایی که نقشه بردار پیش بینی نموده است، انجام می پذیرد. در طی این فرآیند، در کنار طبقه بندی و جداسازی واحدها، تعمیم ویژگی های خاک نیز رخ می دهد؛ چرا که مشاهدات به طبقاتی تقسیم می شوند و یکی از آنها (منظور، خاک رخ شاهد) برای هر واحد، مورد بررسی قرار می گیرد (۱۷). بنابراین، به طور معمول، این نقشه ها و یا داده های استخراج شده از آنها، در تشریح ساختار خصوصیات پیوسته (Continuum) سیمای سرزمین (Landscape) ناتوان می باشند (۱۸)؛ چرا که در جهان واقعی (Reality)، خاک در طول یک سیمای سرزمین و هماهنگ با تغییرات ارتفاعی، به صورت

پیوسته تغییر می یابد. به همین دلیل، برخی از پژوهشگران اعتقاد دارند که عدم قطعیت زیاد در نقشه های سنتی خاک (Traditional soil maps)، از کارایی آنها کاسته است (۳، ۴ و ۱۴). برخی دیگر، نقشه های سنتی خاک را وسایلی ناکارآمد می دانند و ناتوان بودن شناساگران یا نقشه برداران در انتقال و رساندن آشکار و صریح مدل های ذهنی خود را دلیل این ناکارآمدی بیان نموده اند (۸ و ۱۷). محدودیت های موجود برای شناسایی چندگوشه ای خاک و نقشه های حاصل، که ناشی از دیدگاه تغییرپذیری ناپیوسته به خاک است، شناساگران را بر آن داشت تا متناسب با پیشرفت های صورت گرفته در فناوری اطلاعات، در راستای استفاده از روش های نوین شناسایی خاک (که با نام کلی "نقشه برداری رقومی خاک" (Digital Soil Mapping; DSM) شناخته می شوند)، گام بردارند.

۲. نقشه برداری رقومی خاک

این روش، بیان گر مجموعه ای از محاسبات رایانه ای برای پیش بینی پراکنش خاک ها در سیمای سرزمین می باشد و همگام با پیشرفت های به وجود آمده در پردازش اطلاعات، تکامل یافته است (۸). در نقشه برداری رقومی خاک، با استفاده از مدل های مختلف خاک- سیمای سرزمین (Soil-landscape models)، اقدام به ساده سازی پیچیدگی های موجود در سامانه طبیعی خاک می شود. در واقع، مدل های مزبور، نشان دهنده شکل ساده شده ای از روابط پیچیده موجود بین خاک و شکل سرزمین (Landform) می باشند (۷). یکی از مهم ترین مدل هایی که به منظور غلبه بر محدودیت های موجود در روش های سنتی شناسایی خاک ارایه شده است، مدل استنباطی خاک- سرزمین (Soli-Land Inference Model; SoLIM) می باشد (۱۶). مطالعات ژو و همکاران (۱۹ و ۲۰) نشان داد که نقشه های تهیه شده توسط مدل SoLIM، نسبت به نقشه های حاصل از روش سنتی شناسایی خاک، از صحت عمومی بالاتری برخوردار می باشند. از طرفی، برآوردهای انجام شده برای ویژگی های خاک نیز نشان گر دقت بالاتر مدل SoLIM، نسبت به روش های

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

۲. نمونه‌برداری خاک و مطالعات آزمایشگاهی

اطلاعات خاک جمع‌آوری‌شده 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 ژئوپدولوژی 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 حفار شده، براساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرا 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

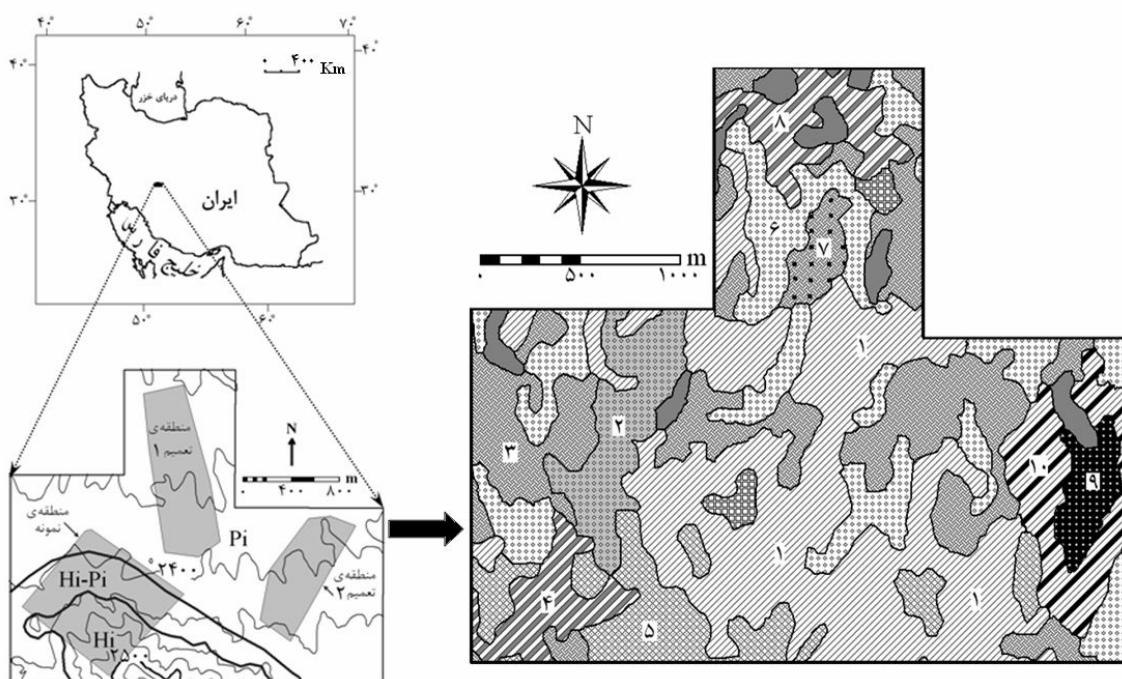
در این مرحله، با استفاده از DEM منطقه، با اندازه پیکسلی و دقت ارتفاعی ۱۰ متر (۳) در محیط نرم‌افزار ایلویس (ILWIS3.4)، با نوشتن فرمان‌نامه‌های (Scripts) مورد نیاز و با استفاده از زیربرنامه‌های (Modules) تعریف‌شده استاندارد موجود در نرم‌افزار آرک-جی‌آی‌اس (Arc-GIS9.2)، مشتقات مختلف مرتبه‌های اول و دوم 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، برآورد 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 ۱۵/۴۹ سانتی‌متر بود و برآوردهای مدل SoLIM و روش سنتی، به‌ترتیب، برابر ۱۵/۵۸ و ۱۴/۳۹ سانتی‌متر بودند. به‌طورکلی، 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 به‌صورت نقشه‌های چندگوشه، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. از آنجایی که نقشه‌های پستی و بلندی (Topographic maps) و مدل‌های رقومی ارتفاع (Digital Elevation Models; DEMs)، تقریباً برای کل کشور وجود دارند و با توجه به عدم وجود مطالعات خاک برای بخش گسترده‌ای از ایران، پژوهش حاضر می‌کوشد تا با هدف تهیه نقشه خاک منطقه بروجن - استان چهارمحال و بختیاری- توسط مدل SoLIM و به‌کارگیری 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" ۵۱° ۱۲' تا ۲۵/۴" ۵۱° ۱۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۷/۴" ۳۱° ۵۴' تا ۳۷/۳" ۳۱° ۵۶' شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه مطالعاتی، به‌ترتیب، 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-Pi: حد واسط دامنه و اراضی تپه ماهوری؛ Hi: اراضی تپه ماهوری. راهنمای نقشه برای واحدهای شماره دار، در جدول (۳) ارائه شده است.

خاک غالب که حدود ۷۵ درصد پوشش خاکی منطقه مطالعاتی را شامل می شدند (جدول ۱)، انجام گرفت. با توجه به این که هدف از این پژوهش، بررسی تعمیم پذیری نتایج حاصل از SolLIM است، از بین ۹۰ خاکرخ موجود در منطقه نمونه، ۴۱ خاکرخ به طور تصادفی انتخاب گردیدند و نقشه ای جداگانه برای این خاکرخها در نرم افزار ایلویس تهیه شد و با به کارگیری عملیات تقاطع (Cross operation)، مقدار عددی هر یک از ویژگی های مدل رقومی ارتفاع برای هر یک از این ۴۱ خاکرخ به دست آمد. در این عملیات، برای هر خاکرخ، محدوده ای با شعاع ۱۵ متر در نظر گرفته شد تا بتوان توزیع آماری ویژگی های مورد نظر آنرا به دست آورد. از آنجایی که اندازه پیکسلی برای نقشه ها 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 منظور شود، نمی توان ویژگی های آماری مربوطه را به دست آورد؛ چراکه یک عدد،

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

به منظور تسهیل در انجام محاسبات و با توجه به این که 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)	درصد نسبی	علامت زیرگروه
A	Clayey-skeletal, carbonatic, mesic Petrocalcic Calcixerepts	۱۱	PP
B	Fine, carbonatic, mesic Petrocalcic Calcixerepts	۱۱	PP
E	Fine, carbonatic, mesic Typic Calcixerepts	۱۰	TP
F	Fine, mixed, active, mesic Typic Calcixerepts	۱۰	TP
G	Fine-loamy, carbonatic, mesic Typic Calcixerepts	۱۱	TP
H	Loamy-skeletal, carbonatic, mesic Typic Calcixerepts	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 دقت تعمیم‌پذیری نتایج SoLIM از منطقه نمونه به دو منطقه تعمیم اشاره‌شده در بند ۲ (به عبارتی، برون‌یابی نتایج حاصل از یک منطقه به مناطق دیگر). ۲. بررسی میزان دقت نتایج SoLIM در منطقه نمونه (به عبارتی، درون‌یابی

دارای توزیع آماری نمی‌باشد). در نتیجه، ماتریس داده‌ها شامل ۳۶۹ سطر (مربوط به پیکسل‌های ۴۱ خاک‌رخ؛ $369 = 41 \times 9$) 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 ینی پایه‌ریزی شده است (۱۱ و ۱۷). این مدل، به‌طور ساده، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = f(E) \quad [2]$$

که در آن، S و E ، به‌ترتیب، بیان‌گر خاک و متغیرهای محیطی هستند و f نشان‌دهنده 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. به‌طورکلی، 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

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

۵. تهیه اطلاعات از خروجی‌های به‌دست 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 می‌توانند خاک‌ها را برآورد کنند، نخست، هر ویژگی مدل رقومی ارتفاع، به تنهایی وارد مدل شد. با توجه به این‌که 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) و ۵۴ (= ۱۸×۳) نقشه فازی به‌دست 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 محاسبه‌شده، مهم‌ترین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع که برآورد بهتری از خاک‌ها داشتند، انتخاب گردیدند. هفت ویژگی مهم‌تر شامل جهت شیب (A)، انحنای نیم‌رخ (P)، مدت پخشیدگی (D)، درصد شیب (S)، انحنای کمینه (M)، جهت جریان (F) و شاخص رسوب (Se) بودند (حروف داخل پرانتزها، به‌عنوان علامت اختصاری برای ویژگی‌های گفته‌شده 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، به‌عنوان نقشه مقدماتی واحدهای خاک انتخاب گردید. با اعمال فیلتر بیشینگی (Majority filter) (در محیط نرم‌افزاری ایلویس) بر روی نقشه انتخاب‌شده، اقدام به یکنواخت‌سازی پیکسل‌ها (خاک‌ها) با فراوانی بیشتر شد. لازم به ذکر است که تا این مرحله، تمامی نقشه‌های تولید شده به‌صورت نقشه‌های شبکه‌ای (Raster)

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 (Minimum Legible Area; MLA) در مقیاس ۱:۲۴۰۰۰ براساس روش کرنل (Cornell) می‌باشد (۶). نقشه چندگوشه‌ای حاصل، نقشه پایانی واحدهای خاک را به‌دست داد.

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 جداشده، 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):

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad [3]$$

که در آن، i و j، به ترتیب، بیان‌گر سطر اُم و ستون اُم 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 گفته‌شده (واقعیت منطقه و مدل SoLIM)، طبق اصول نقشه‌برداری خاک نام‌گذاری شدند (۱۲). پس از این کار، نام واحدهای نقشه حاصل از SoLIM با واقعیت مقایسه شدند. بدین ترتیب، دقت مدل SoLIM در برآورد و پیش‌بینی واحدهای خاک (نه نوع خاک) تعیین گردید.

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 برون‌یابی 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 درون‌یابی 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 برآورد 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، نمایان‌گر این است که سه زیرگروه تیپیک کلسی‌زرپتز (Typic Calcixerepts)، پتروکلسیک کلسی‌زرپتز (Petrocalcic Calcixerepts) و کلسیک هاپلوزرالفز (Calcic Haploxerepts)، 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 برون‌یابی (بر مبنای خاک‌رخ‌های دو منطقه تعمیم)، درون‌یابی (براساس خاک‌رخ‌های منطقه نمونه که وارد محاسبات نشده‌اند) و صحت کلی در برآورد 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

برابر افزایش یافته است. لازم به ذکر است که صحت برآورد فامیل‌های خاک نیز در هر ترکیب متفاوت است؛ برای نمونه، در ترکیب ADMS، فامیل‌های A و B با صحتی حدود ۶۰ درصد، برآورد درستی داشته‌اند؛ درحالی‌که فامیل‌های H و J، دارای صحت ۲۲ و صفر بوده‌اند. به عبارت دیگر، فامیل J در این ترکیب، ۱۰۰ درصد نادرست برآورد شده 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 برآورد نشده است و در نقشه به‌دست آمده، این فامیل مشاهده نمی‌شود. به‌عنوان مثال، نقشه خاک تهیه‌شده از ترکیب ADSeS، فاقد 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 به‌عنوان 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، همان‌طور که گفته شد ترکیب ADMS با صحت حدود ۶۰ درصد، برآورد 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 محاسبه‌شده در جدول ۲، نشان می‌دهند که برون‌یابی 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 مسأله می‌تواند با توجه به دلایل زیر قابل توجیه باشد:

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

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

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

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

زیاد، ویژگی‌های دیگر از اهمیت بیش‌تری برخوردار هستند. این احتمال وجود دارد که هر کدام از مناطق تعمیم 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 کارایی بهتر مدل برای مناطق دارای اطلاعات بیش‌تر و یا تأثیرگذاری بهتر و مطلوب‌تر ویژگی‌های به‌کار رفته در مدل برای این منطقه دانست. بنابراین، می‌توان گفت برای استفاده از مدل SoLIM، بهتر است که از کل منطقه مورد نظر، اطلاعات به‌دست آورد و وارد مدل نمود. با توجه به این موضوع و نظر به این‌که در روش مرسوم نقشه‌برداری خاک (روش فیزیوگرافی)، برخلاف روش ژئوپدولوژی، 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 کارایی قابل قبول مدل SoLIM و ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در برآورد خاک‌های منطقه

مطالعاتی در این سطح می‌باشد. شکل ۱ (راست) نقشه پایانی واحدهای پراکنش خاک‌ها برای کل منطقه 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 صحرا (از نظر نام واحد خاک، نه نوع خاک)، نام‌گذاری واحدهای نقشه، یک‌بار براساس واقعیت منطقه (با ۱۲۵ خاک‌رخ موجود) و یک‌بار هم بر مبنای نقشه حاصل از مدل SoLIM (نقشه حاصل از بند "۵") انجام شد. در این‌جا، مقایسه‌ای کیفی برای نوع و نام واحدهای نقشه صورت گرفت؛ صرف‌نظر از این‌که نوع خاک (فامیل یا زیرگروه) در هر واحد، با چه صحتی برآورد شده است.

برای نمونه، واحد شماره ۵ در واقعیت صحرائی، "اجتماع H، F و G" 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

جدول ۳. مقایسهٔ اسامی واحدهای خاک تفکیک‌شده برای منطقهٔ مطالعاتی، براساس برآورد مدل SoLIM و واقعیت صحرایی در دو سطح زیرگروه و فامیل خاک

موقعیت منطقه	واحد نقشه	سطح رده‌بندی (کلید رده‌بندی آمریکایی، ۲۰۱۰)					
		فامیل خاک			زیرگروه		
		واقعیت صحرایی		SoLIM	واقعیت صحرایی		SoLIM
		نام واحد (فامیل)	فامیل‌های غالب*	نام واحد (فامیل)	فامیل‌های غالب*	نام واحد (زیرگروه)	نام واحد (زیرگروه)
منطقه ۱	۱	اجتماع E, B و G	H,B,G,E	اجتماع G, A و B	H,B,A,G	اجتماع TP و PP	اجتماع TP و PP
	۲	اجتماع A و B, F	J,A,B,F	اجتماع E, J و H	A,H,J,E	اجتماع TP و PP	اجتماع CF و PP
	۳	کمپلکس F و J, X	F,J,X	کمپلکس E و F, J	G,E,F,J	کمپلکس TP و CF	کمپلکس TP و CF
	۴	اجتماع G و X, B	G,X,B	اجتماع G, H و B	J,B,H,G	اجتماع TP و PP	اجتماع TP و PP
	۵	اجتماع G و F, H	A,G,F,H	اجتماع G و H	A,E,G,H	خاک TP	خاک TP
منطقه ۲	۶	اجتماع J و A	B,J,A	اجتماع E, J و G	A,G,J,E	اجتماع TP و CF	اجتماع TP و CF
	۷	اجتماع A و J, X	G,A,J,X	اجتماع E و F, J	G,F,E,J	اجتماع TP و CF	اجتماع TP و CF
	۸	اجتماع J و B	B,J	اجتماع G و J	F,J,G	اجتماع TP و CF	اجتماع TP و CF
منطقه ۳	۹	کمپلکس E و J	G,A,E,J	کمپلکس E و J	G,H,J,E	کمپلکس TP و CF	کمپلکس TP و CF
	۱۰	اجتماع G و F, E	X,G,F,E	اجتماع G و E	H,J,E,G	خاک TP	خاک TP

*: 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 منطقهٔ مطالعاتی است.

تیبیک کلسی‌زرپتز" برآورد کرده 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 مقایسهٔ نام واحدها بین روش SoLIM و واقعیت منطقه، نشان‌گر آن است که در بیشتر موارد، یک یا دو خاک، به‌درستی در نام واحد مربوطه قرار گرفته‌اند (جدول ۳).

به‌علاوه، توجه به ستون خاک‌های غالبی که توسط SoLIM برآورد شده‌اند و خاک‌های غالبی که در واقعیت منطقه وجود دارند، نشان‌دهندهٔ 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،

غیرمشابه (Non-similar soils) (۱۲)، در نام این واحد وارد نمی‌شود. به‌علاوه، 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 برآورد 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 برآورد کرده است. هم‌چنین، در نام‌گذاری واحد ۵ براساس سطح زیرگروه، مشاهده می‌گردد که نتیجهٔ روش SoLIM با واقعیت صحرا، یکسان است و واحد خاک مزبور را از نوع همگون (Consociation) با نام "خاک

هرچند این مدل در برآورد مکان دقیق خاک‌ها در سطح فامیل، دارای صحت پایینی است (جدول ۲)؛ لیکن در برآورد وجود خاک‌های مختلف در واحدهای خاک، دقت قابل قبولی را نشان می‌دهد (جدول ۳). البته بایستی توجه داشت که صحت پایین مدل SoLIM در برآورد مکان دقیق خاک‌ها در سطح فامیل، دلیلی بر کارایی پایین آن نمی‌باشد؛ چراکه این برآوردها تنها براساس ویژگی‌های DEM (به‌عنوان یکی از پنج عامل خاک‌ساز) انجام شده‌اند. به‌طورکلی، می‌توان گفت که روش SoLIM در برآورد نوع واحدهای نقشه و موقعیت مکانی خاک‌های موجود در آنها از صحت قابل قبولی برخوردار است. در عمل، بایستی توجه داشت که نقشه حاصل (شکل ۱- راست)، پراکنش خاک‌ها را بر مبنای ویژگی‌های استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع نشان می‌دهد. برای این‌که بتوان این نقشه را به نقشه خاکی تبدیل نمود که از نظر مدیریتی هم کارایی 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 سستی 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 درون‌یابی و با صحت کلی حدود ۶۰ درصد در

منابع مورد استفاده

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

برون‌یابی نوع خاک، برآورد درستی را در سطح زیرگروه خاک به ارمغان آورد. مقدار این صحت عمومی، به ترکیب‌های مختلف ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع بستگی دارد. ۲. به‌کارگیری ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در مدل استنباطی خاک-سرزمین (مدل SoLIM)، هرچند که نتایج چندان قابل قبولی را در سطح فامیل ارائه نکرد؛ اما این انتظار وجود دارد که استفاده از ویژگی‌های بیشتر، داده‌های ورودی دیگر (به‌عنوان مثال، استفاده از نقشه‌های ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی) و نیز کاربرد مدل رقومی ارتفاع با دقت بالاتر (دقت بیش از ۱۰ متر) می‌تواند نتایج را بهبود بخشد. ۳. مدل SoLIM به‌خوبی می‌تواند برآورد درستی از نوع و نام واحدهای خاک، حتی در برون‌یابی، 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. به‌منظور افزایش کارایی مدل SoLIM، بهتر است که از کل منطقه مطالعاتی، اطلاعات به‌دست آورد و وارد مدل نمود. هم‌چنین، علاوه بر مشاهدات صحرایی، استفاده از نظرات افراد کارشناس در تعریف توابع عضویت فازی برای مدل SoLIM، به‌ویژه در مواقعی که نمونه‌های موجود کافی نیستند و یا نماینده خوبی برای معرفی منطقه مورد نظر نمی‌باشند، می‌تواند کارگشا باشد. ۵. ابزارهای 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 به‌همراه اطلاعات دیگر (مانند تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین‌شناسی و غیره)، به منظور بررسی ارتقای کیفی نقشه‌های خاک قدیمی و به‌هنگام کردن آنها پیشنهاد می‌شود.

۲. باقری بداغ‌آبادی، م. و م.ج. 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. Booltink 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.