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

محسن باقری بداغ‌آبادی[۱]، محمدحسن صالحی[۱*]، عیسی اسفندیارپور بروجنی[۲]، جهانگرد محمدی[۱]، علیرضا کریمی‌کارویه[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 به‌همراه دارد. راه‌کارهای نوین ارایه‌شده برای غلبه بر این محدودیت‌ها (که به‌طور کلی، "نقشه‌برداری رقومی خاک" نامیده می‌شوند)، با بررسی تغییرات پیوستهٔ خاک، تلاش می‌کنند براساس متغیرهای محیطی که به‌سادگی قابل دست‌یابی یا محاسبه هستند، کلاس‌های خاک یا ویژگی‌های آن را پیش‌بینی کنند. پژوهش حاضر می‌کوشد تا با هدف تهیهٔ نقشهٔ خاک منطقهٔ بروجن- استان چهارمحال و بختیاری- توسط مدل SoLIM و به‌کارگیری مدل رقومی ارتفاع و ویژگی‌های آن، گامی جدید در راستای تهیهٔ 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 به‌همراه سه زیرگروه و هفت فامیل خاک غالب موجود در منطقهٔ مطالعاتی (شامل ۴۱ خاک‌رخ از ۱۲۵ خاک‌رخ حفرشده در کل منطقه)، ماتریس داده‌های ورودی به مدل SoLIM را تشکیل دادند. نقشه‌های خاک فازی به‌دست آمده از SoLIM در سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (نرم‌افزار آرک- جی‌آی‌اس) به نقشهٔ چندگوشه‌ای پراکنش خاک‌ها تبدیل شدند. نتایج نشان داد که ترکیبات گوناگون ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در برآورد نوع خاک‌ها دقت متفاوتی دارند، و به‌طورکلی، 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: نقشهٔ خاک، مدل SoLIM، منطق فازی، نقشه‌برداری رقومی خاک، مدل رقومی ارتفاع

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

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

۳. گروه خاک‌شناسی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

مقدمه

شناسایی خاک (Soil survey)، به‌عنوان 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. به‌طورکلی، 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 شیوهٔ 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 ینی (۱۰) استوار می‌باشد. (سال ۱۹۴۱) با به‌کارگیری مدل زیر، خاک را دستاورد برهم‌کنش عوامل خاک‌ساز معرفی نموده است:

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

که Cl، O، R، P و T، به‌ترتیب، 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، گسترهٔ خاک به واحدهای همگن‌تر تفکیک می‌گردد. این‌کار با کشیدن مرزهایی که نقشه‌بردار پیش‌بینی نموده است، انجام می‌پذیرد. در طی این فرآیند، در کنار طبقه‌بندی و جداسازی واحدها، 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، به‌طور معمول، این نقشه‌ها و یا داده‌های استخراج‌شده از آنها، در تشریح ساختار خصوصیات پیوستهٔ (Continuum) سیمای سرزمین (Landscape) ناتوان می‌باشند (۱۸)؛ چرا که در جهان واقعی (Reality)، خاک در طول یک سیمای سرزمین و هماهنگ با تغییرات ارتفاعی، به‌صورت پیوسته تغییر می‌یابد. به همین دلیل، برخی از پژوهش‌گران اعتقاد دارند که عدم قطعیت زیاد در نقشه‌های سنتی خاک (Traditional soil maps)، از کارآیی آن‌ها کاسته است (۳، ۴ و ۱۴). برخی دیگر، نقشه‌های سنتی خاک را وسایلی ناکارآمد می‌دانند و ناتوان بودن شناسگران 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، شناسگران 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) شناخته می‌شوند)، گام بردارند.

۲. نقشه‌برداری رقومی خاک

این روش، بیان‌گر مجموعه‌ای از محاسبات رایانه‌ای برای پیش‌بینی پراکنش خاک‌ها در سیمای سرزمین می‌باشد و همگام با پیشرفت‌های به‌وجود 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 سامانهٔ طبیعی خاک می‌شود. در واقع، مدل‌های مزبور، نشان‌دهندهٔ شکل ساده‌شده‌ای از روابط پیچیدهٔ موجود بین خاک و شکل سرزمین (Landform) می‌باشند (۷). یکی از مهم‌ترین مدل‌هایی که به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در روش‌های سنتی شناسایی خاک ارایه شده است، مدل استنباطی خاک- سرزمین (Soli-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 سنتی شناسایی خاک، از صحت عمومی بالاتری برخوردار می‌باشند. از طرفی، برآوردهای انجام‌شده برای ویژگی‌های خاک نیز نشان‌گر دقت بالاتر مدل SoLIM، نسبت به روش‌های

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

مرسوم بوده‌اند. ژو و همکاران (۱۸) با مقایسهٔ مدل SoLIM و روش سنتی شناسایی خاک، به‌منظور تخمین ضخامت افق A در منطقهٔ 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 ۱۴/۳۹سانتی‌متر 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 ارایهٔ 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 تهیهٔ نقشهٔ خاک منطقهٔ بروجن - استان چهارمحال و بختیاری- توسط مدل SoLIM و به‌کارگیری DEM و ویژگی‌های آن در نقشه‌برداری رقومی خاک، گامی جدید در راستای تهیهٔ نقشه‌های خاک و ویژگی‌های آنها بردارد.

مواد و روش‌ها

۱. معرفی منطقهٔ مطالعاتی

منطقهٔ مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۱۰۰۰ هکتار در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ″۳۶/۴ ′۱۲ °۵۱ تا ″۲۵/۴ ′۱۵ °۵۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ″۴۷/۴ ′۵۴ °۳۱ تا ″۳۷/۳ ′۵۶ °۳۱ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقهٔ مطالعاتی، به‌ترتیب، زریک (Xeric) و مزیک (Mesic) می‌باشند. سیمای سرزمین در این منطقه، شامل اراضی تپه‌ماهوری (Hill-land) و دامنه (Piedmont) می‌باشد.

۲. نمونه‌برداری خاک و مطالعات آزمایشگاهی

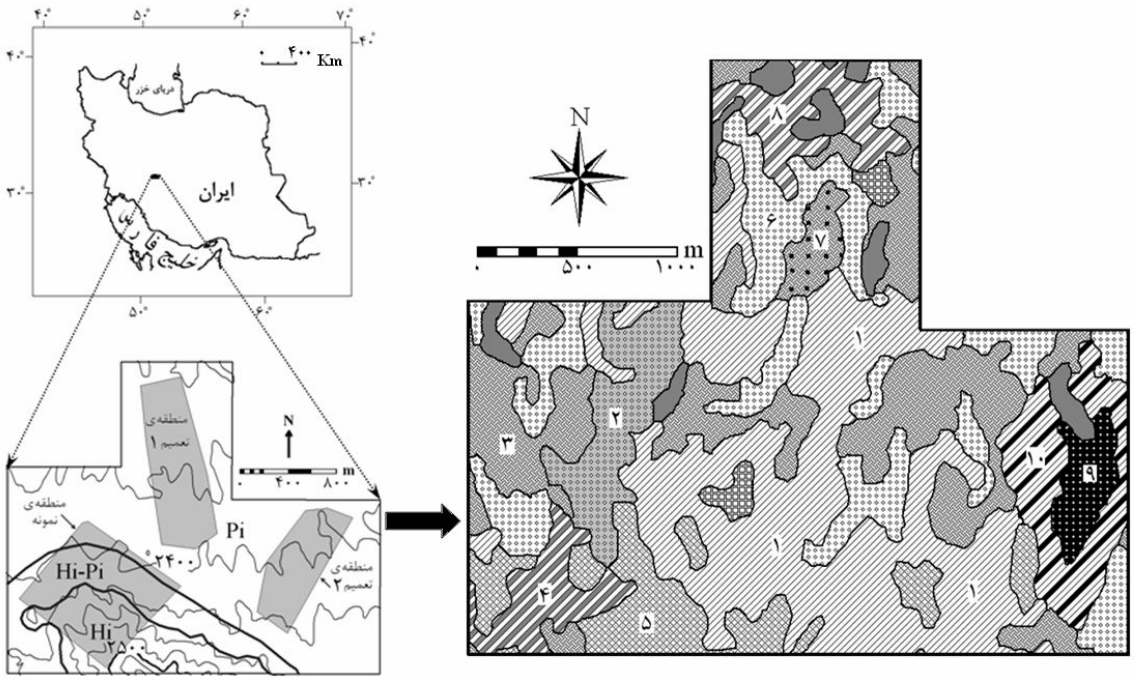
اطلاعات خاک جمع‌آوری‌شده از منطقهٔ مطالعاتی، شامل دو مجموعه دادهٔ مختلف می‌باشند. مجموعهٔ اول، شامل اطلاعات حاصل از تشریح، نمونه‌برداری و نتایج فیزیکی و شیمیایی تعداد ۱۰۵ خاک‌رخ در منطقهٔ بروجن می‌باشند که اسفندیارپور بروجنی (۱) براساس اصول روش ژئوپدولوژی و در قالب تعیین دو منطقهٔ نمونه (Sample area) و منطقهٔ تعمیم (Validation area)، که در این مقاله، تحت عنوان منطقهٔ تعمیم ۱ (شکل ۱) به آن اشاره شده، جمع‌آوری نموده است. مجموعه دادهٔ 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، منطقهٔ تعمیم ۲ (شکل ۱) نامیده شده است. تمامی خاک‌رخ‌های حفرشده، 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. تهیهٔ داده‌های رقومی و پردازش آنها

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]



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

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 نیم‌رخی (Profile Curvature) و خمیدگی شکل سطح (Planform Curvatur)، 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).

به‌منظور تسهیل در انجام محاسبات و با توجه به این‌که برخی از خاک‌رخ‌ها، فراوانی ناچیزی داشتند؛ این خاک‌رخ‌ها از نقشهٔ اولیه حذف گردیدند و ادامهٔ کار، تنها روی هفت فامیل خاک غالب که حدود ۷۵ درصد پوشش خاکی منطقهٔ مطالعاتی را شامل می‌شدند (جدول ۱)، انجام گرفت. با توجه به این‌که هدف از این پژوهش، بررسی تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از SoLIM است، از بین ۹۰ خاک‌رخ موجود در منطقهٔ نمونه، ۴۱ خاک‌رخ به‌طور 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 به‌دست آمد. در این عملیات، برای هر خاک‌رخ، محدوده‌ای با شعاع ۱۵ متر در نظر گرفته شد تا بتوان توزیع آماری ویژگی‌های مورد نظر آن‌را به‌دست آورد. از آن‌جایی که اندازهٔ پیکسلی برای نقشه‌ها ۱۰ متر بود؛ بنابراین، محدودهٔ هر خاک‌رخ، نه پیکسل را به خود اختصاص داد (لازم به ذکر است که اگر برای هر خاک‌رخ، تنها یک پیکسل منظور شود، نمی‌توان ویژگی‌های آماری مربوطه را به‌دست آورد؛ چراکه یک عدد،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

جدول ۱. رده‌بندی خاک‌های غالب منطقهٔ مطالعاتی، به‌همراه فراوانی نسبی هر خاک

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

دارای توزیع آماری نمی‌باشد). در نتیجه، ماتریس داده‌ها شامل ۳۶۹ سطر (مربوط به پیکسل‌های ۴۱ خاک‌رخ؛ ۳۶۹= ۹×۴۱) 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 منطقهٔ 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:

$$S = f(E) \qquad [۲]$$

که در آن، S و E، به‌ترتیب، بیانگر خاک و متغیرهای محیطی هستند و f، نشان‌دهندهٔ رابطهٔ خاک- محیط (مدل خاک- سرزمین) می‌باشد (۱۱ و ۱۷). براساس این مدل، اگر ویژگی‌های محیطی و رابطهٔ خاک- محیط، برای یک موقعیت شناخته شده باشند؛ آنگاه، خاک و یا ویژگی‌های آن در منطقهٔ مورد نظر قابل استنتاج خواهند بود. به‌طورکلی، SoLIM با در نظر گرفتن محیط سازندهٔ هر خاک و روابط خاک- سرزمین (که توسط اطلاعات خاک‌شناسان از منطقهٔ مورد نظر تعریف می‌شوند)، اقدام به تشکیل یک پایگاه دانش (Knowledge base) می‌کند (لازم به ذکر است که در این مدل، سامانه‌های خبره (Expert systems) نیز به‌کار گرفته می‌شوند). از طرفی، ویژگی‌های محیطی منطقهٔ 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 به‌کار 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 به‌دست آمده (فامیل خاک‌ها و زیرگروه خاک‌ها) در مرحلهٔ 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 منطقهٔ نمونه در ماتریس‌های داده‌ها تعریف شدند. بدین ترتیب، ارزیابی نتایج به دو صورت زیر انجام پذیرفت:

۱. بررسی میزان دقت تعمیم‌پذیری نتایج SoLIM از منطقهٔ نمونه به دو منطقهٔ تعمیم اشاره‌شده در بند ۲ (به عبارتی، برون‌یابی نتایج حاصل از یک منطقه به مناطق دیگر). ۲. بررسی میزان دقت نتایج SoLIM در منطقهٔ نمونه (به عبارتی، درون‌یابی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

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

۵. تهیهٔ اطلاعات از خروجی‌های به‌دست آمده از مدل SoLIM

مدل SoLIM در هر بار اجرا شدن، برای هر خاک، یک نقشهٔ فازی با درجهٔ عضویت صفر تا یک ارایه می‌کند؛ بنابراین، برای هفت فامیل خاک و سه زیرگروه خاک در هر بار اجرا شدن این مدل، به‌ترتیب، 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 ویژگیِ 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، به‌ترتیب، تعداد ۱۲۶ (=۱۸×۷) و ۵۴ (=۳×۱۸) نقشهٔ فازی به‌دست آمدند. برای هر نقشهٔ خاک حاصل از یک ویژگی مدل رقومی ارتفاع، صحت عمومی نقشه‌ها (Overall map accuracy) (به بخش "۶" مراجعه شود) محاسبه شد. سپس، براساس صحت عمومیِ محاسبه‌شده، مهم‌ترین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع که برآورد بهتری از خاک‌ها داشتند، انتخاب گردیدند. هفت ویژگی مهم‌تر شامل جهت شیب (A)، انحنای نیمرخی (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 مرحلهٔ 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 نقشهٔ با بیشترین صحت عمومی، به‌عنوان نقشهٔ مقدماتیِ واحدهای خاک انتخاب گردید. با اعمال فیلتر بیشینگی (Majority filter) (در محیط نرم‌افزاری ایلویس) بر روی نقشهٔ انتخاب‌شده، اقدام به یکنواخت‌سازی پیکسل‌ها (خاک‌ها)ی با فراوانی بیشتر شد. لازم به ذکر است که تا این مرحله، تمامی نقشه‌های تولید شده به‌صورت نقشه‌های شبکه‌ای (Raster) بودند. نقشهٔ حاصل از مرحلهٔ 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). نقشهٔ چندگوشه‌ای حاصل، نقشهٔ پایانیِ واحدهای خاک را به‌دست داد.

۶. ارزیابی نتایج

ارزیابی نتایج به دو صورت کمی و کیفی بررسی گردید. ارزیابیِ کمی نتایج نهایی مدل SoLIM، از طریق محاسبهٔ صحت عمومی نقشه (OA) انجام گرفت. صحت عمومی نقشه، نشان‌دهندهٔ 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، به‌واسطهٔ تشکیل ماتریس درهمی (Confusion matrix) و با توجه به فرمول زیر قابل محاسبه است (۱۰):

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

که در آن، i و j، به‌ترتیب، بیانگر سطر iاُم و ستون jاُم برای مشاهدهٔ X موجود در ماتریس درهمی می‌باشند. ارزیابی کیفی نتایج SoLIM، با نام‌گذاری واحدهای خاک نقشهٔ پایانی انجام شد. برای این منظور، مساحت هر فامیل خاک در واحدهای نقشهٔ خاک پایانی، یک‌بار براساس واقعیت منطقه (با استفاده از ۱۲۵ خاک‌رخ موجود) و بار دیگر، بر مبنای نقشهٔ خاک حاصل از مدل SoLIM (نقشهٔ 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 این‌کار، نام واحدهای نقشهٔ حاصل از SoLIM با واقعیت مقایسه شدند. بدین‌ترتیب، دقت مدل SoLIM در برآورد و پیش‌بینی واحدهای خاک (نه نوع خاک) تعیین گردید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

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

۱. برای دو منطقهٔ تعمیم: که در این حالت، دقت مدل SoLIM در برون‌یابی نتایج ارزیابی شد. ۲. برای منطقهٔ نمونه: که این‌کار با استفاده از خاک‌رخ‌هایی که وارد محاسبات نشده بودند (۴۹ خاک‌رخ باقی‌مانده از منطقهٔ 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 منطقهٔ 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 منطقهٔ 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 Haploxeralfs)، 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 منطقهٔ تعمیم)، درون‌یابی (براساس خاک‌رخ‌های منطقهٔ نمونه که وارد محاسبات نشده‌اند) و صحت کلّی در برآورد نوع خاک‌ها (با لحاظ نمودن تمامی خاک‌رخ‌های حفرشده در کل منطقهٔ 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 نقشهٔ به‌دست آمده، این فامیل مشاهده نمی‌شود. به‌عنوان مثال، نقشهٔ 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 یا B باشیم، همان‌طورکه 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 عمومیِ محاسبه‌شده در جدول ۲، نشان می‌دهند که برون‌یابی انجام‌شده برای مناطق تعمیم و یا به عبارت بهتر، تعمیم نتایج منطقهٔ 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. منطقهٔ نمونهٔ انتخاب‌شده، نمایندهٔ واقعی مناطق تعمیم نمی‌باشد. ۲. میزان تأثیر ویژگی‌های انتخاب‌شده از مدل رقومی ارتفاع براساس ۴۱ خاک‌رخ منطقهٔ نمونه، متفاوت از مناطق تعمیم می‌باشد. به عبارت دیگر، در مناطق تعمیم، به احتمال

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

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	ADMSeS
J	۷۰/۲	۶۰/۲	۳۳/۱	۳۷/۱	۲۹/۲	۱۶/۷	ADSeS
F و B	۷۹/۱	۵۹/۱	۳۹/۰	۳۹/۳	۲۹/۲	۲۰/۸	ADFSeS
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	ADMPSeS
–	۸۶/۸	۶۵/۲	۶۲/۱	۴۵/۵	۲۹/۲	۲۹/۲	ADFMPSeS

*: جهت شیب (A)، انحنای نیمرخی (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. ۳. 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 منطقهٔ نمونه (انجام درون‌یابی) را می‌توان ناشی از کارآیی 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 منطقهٔ 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 توجهٔ صحت عمومی برای سطح زیرگروه، حاکی از کارآیی قابل قبول مدل SoLIM و ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع در برآورد خاک‌های منطقهٔ 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 مقایسهٔ 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 نقشهٔ حاصل از مدل SoLIM (نقشهٔ 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 شمارهٔ ۵ در واقعیت صحرایی، "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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

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)					
		زیرگروه		فامیل خاک			
				SoLIM		واقعیت صحرایی	
		SoLIM	واقعیت صحرایی	نام واحد (فامیل)	فامیل‌های غالب*	نام واحد (فامیل)	فامیل‌های غالب*
منطقهٔ نمونه	۱	اجتماع PP و TP	اجتماع PP و TP	اجتماع G، A و B	H،B،A،G	اجتماع E، G و B	H،B،G،E
	۲	اجتماع PP وCF	اجتماع PP و TP	اجتماع E، J و H	A،H،J،E	اجتماع F، B و A	J،A،B،F
	۳	کمپلکس CF و TP	کمپلکس TP و CF	کمپلکس J، F و E	G،E،F،J	کمپلکس X، J وF	F،J،X
	۴	اجتماع TP و PP	اجتماع PP وTP	اجتماع G، H و B	J،B،H،G	اجتماع B، X و G	G،X،B
	۵	خاک TP	خاک TP	اجتماع H و G	A،E،G،H	اجتماع H، F و G	A،G،F،H
منطقهٔ تعمیم ۱	۶	اجتماع TP و CF	اجتماع TP و CF	اجتماع E، J و G	A،G،J،E	اجتماع A و J	B،J،A
	۷	اجتماع CF و TP	اجتماع TP و CF	اجتماع J، E و F	G،F،E،J	اجتماع X، J وA	G،A،J،X
	۸	اجتماع TP و CF	اجتماع CF و PP	اجتماع G و J	F،J،G	اجتماع B و J	B،J
منطقهٔ تعمیم ۲	۹	کمپلکس TP و CF	کمپلکس CF و TP	کمپلکس E و J	G،H،J،E	کمپلکس J و E	G،A،E،J
	۱۰	خاک TP	خاک TP	اجتماع G و E	H،J،E،G	اجتماع E، F و G	X،G،F،E

*: 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.

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. همان‌طورکه 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 تیپیک 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 پیش‌بینی‌درست مدل SoLIM در این رابطه می‌باشد. این موضوع، حتی در مورد برون‌یابی‌های انجام‌شده برای مناطق تعمیم نیز صادق است (جدول ۳). به عبارت دیگر،

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

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 کارآیی 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 نقشهٔ حاصل (شکل ۱- راست)، پراکنش خاک‌ها را بر مبنای ویژگی‌های استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع نشان می‌دهد. برای این‌که بتوان این نقشه را به نقشهٔ 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 رابطهٔ 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 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 ارایه 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 کارآیی مدل SoLIM، بهتر است که از کل منطقهٔ مطالعاتی، اطلاعات به‌دست آورد و وارد مدل نمود. هم‌چنین، علاوه‌بر 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 نمایندهٔ خوبی برای معرفی منطقهٔ 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، نقشهٔ زمین‌شناسی و غیره)، به منظور بررسیِ ارتقای کیفی نقشه‌های خاک قدیمی و به‌هنگام کردن آنها پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]

۲. باقری بداغ‌آبادی، م. و م.ح. صالحی. ۱۳۸۸. کاربرد سطح مؤثر نیمرخ خاک برای تعیین خلوص واحدهای نقشهٔ خاک. یازدهمین کنگرهٔ 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.12.9]