

ارزیابی مدل استنباط خاک (SIE) در نقشه برداری خاک با تأکید بر استفاده از دانش کارشناس و منطق فازی (شهرستان جلفا - گلفرج)

آذر فاریابی* و حمیدرضا متین فر^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۲)

چکیده

یکی از مشکلات نقشه برداری مرسوم خاک‌ها، تکیه بر نظرات کارشناسی، وقت گیر بودن و زمان بر بودن تهیه و روزآمد کردن نقشه‌ها است. در حالی که نقشه برداری رقومی خاک، با استفاده از مدل‌های مختلف خاک - سیمای زمین، منجر به ساده‌سازی پیچیدگی‌های موجود در سامانه طبیعی خاک می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی مدل استنباط خاک (SIE) در نقشه برداری خاک با تأکید بر استفاده از دانش کارشناسی و منطق فازی است. برای این منظور لایه رقومی زمین‌شناسی و لایه‌های محیطی از مدل رقومی ارتفاع شامل: ارتفاع، شیب، شکل انحنای سطح زمین و شاخص خیزی استخراج شدند که داده‌های ورودی مدل SIE را تشکیل می‌دهند، سپس نقشه‌های فازی برای پنج نوع خاک تهیه و نقشه نهایی پیش‌بینی خاک با عمل غیر فازی کردن، ایجاد شد. نتایج نشان داد که مدل SIE که از متغیرهای محیطی استفاده می‌کند، توانایی بالایی در جداسازی انواع خاک با جزئیات بیشتر دارد و خاک‌هایی که مواد مادری متفاوتی دارند را کاملاً از هم جدا می‌کند. مقایسه ماتریس خطا نشان می‌دهد که صحت کلی نقشه استنتاج شده از مدل SIE، برابر ۷۵ درصد است، همچنین انطباق نتایج نقشه برداری رقومی با نقشه برداری مرسوم، بیانگر انطباق ۷۴/۶۸ درصدی نتایج است و تفاوت در میزان انطباق را می‌توان به تفاوت در ماهیت دو روش مرتبط دانست.

واژه‌های کلیدی: نقشه برداری رقومی خاک، مدل رقومی ارتفاع، منطق فازی، مدل SIE

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: azarfariabi@gmail.com

مقدمه

روش‌های معمول بررسی خاک‌ها از نظر زمان و هزینه مورد نیاز برای تکمیل آنها، نسبتاً گران هستند. طبق نظر کوک و همکاران (۴) معمولاً، خاشناسان توسعه روابط خاک - چشم‌انداز را با استفاده از اطلاعات مکانی خاص که در سراسر چشم‌انداز برای مکان‌های نمونه‌برداری نشده، قابل تعمیم است را ترجیح می‌دهند. نقشه برداری رقومی خاک براساس عوامل پنج‌گانه تشکیل خاک و اطلاعات منتج شده از متغیرهای کمکی خاک است.

لئو و همکاران (۹) نشان دادند که توزیع رده‌های خاک به مقدار زیادی تحت تأثیر مواد مادری و توپوگرافی است، اما امکان دارد که پوشش گیاهی بسیار مشابهی داشته باشند. از این‌رو، اطلاعات مواد مادری محلی و توپوگرافی می‌توانند به‌عنوان متغیرهای کمکی خاک برای نقشه‌برداری رده‌های خاک در مناطق کوهستانی استفاده شوند. پیش‌بینی نقشه‌برداری رقومی خاک، با استفاده از مدل توصیفی روابط بین متغیرهای کمکی خاک و خاک اجرا می‌شود (۱۵).

مدل‌سازی روابط، گام کلیدی است که سزاوار توجه ویژه‌ای در نقشه‌برداری رقومی خاک است (۱۱). نقشه‌برداری رقومی خاک براساس دانش کارشناسی به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌بینی طبقه‌بندی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها استفاده شده است. مدل‌های مبتنی بر دانش منطق فازی اجازه ادغام صریح و روشن دانش و نظر کارشناسان نقشه‌بردار خاک آشنا به منطقه را می‌دهد (۱۷).

شناسایی رقومی خاک‌ها به‌عنوان ابزاری برای ایجاد اطلاعات مکانی خاک، راه‌حلی برای نیاز رو به افزایش نقشه‌های خاک با تفکیک مکانی بالا را تأمین می‌کند، بنابراین، باید استراتژی‌ها و روش‌های جدید به‌منظور به‌دست آوردن اطلاعات مکانی خاک با تفکیک مکانی بالا توسعه یابد (۱۶ و ۲۴).

یکی از جنبه‌های اساسی در نقشه‌برداری رقومی خاک، استفاده از مدل‌های مختلف به‌منظور ساده‌سازی پیچیدگی‌های موجود در سامانه طبیعی خاک است. بر این اساس، مدل‌های

خاک - سیمای سرزمین، بیانگر شکل ساده‌شده‌ای از روابط پیچیده موجود، بین خاک و شکل سرزمین هستند که فرایندهای تکاملی خاک و الگوی پراکنش آن را نشان می‌دهند (۷).

مدل استنباطی خاک - محیط ArcSIE از جمله مدل‌هایی است که به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در روش‌های شناسایی سنتی خاک، توسط شی (۲۶) در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است. در این مدل، نقشه خاک بر پایه مدل خاک محیط ایجاد می‌شود، بدین معنا که خاک تابعی از عوامل محیطی است.

$$S = f(E) \quad [1]$$

این مدل بیان می‌کند که اطلاعات در مورد خاک (S) را می‌توانید از اطلاعات مربوط به محیط زیست، شکل‌گیری خاک (E)، از جمله توپوگرافی، زمین‌شناسی، آب‌وهوا، پوشش گیاهی و غیره به‌دست آورد. مؤلفه‌های مهم در این مدل، ارتباط بین خاک و محیط‌زیست آن (f) است. ArcSIE با یک رویکرد مبتنی بر دانش، ارتباط بین عوامل تشکیل خاک را پشتیبانی می‌کند.

ArcSIE با دو نوع دانش کار می‌کند: یکی استدلال قاعده‌ها که به‌صورت مقادیر سیمای محیطی تعریف می‌شوند و دیگری استدلال موردها که در فضای جغرافیایی تعریف می‌شوند که می‌تواند به‌صورت نقطه، خط، پلی‌گون و یا پیکسل باشد. این مدل بر پایه منطق فازی استوار است که خروجی اولیه حاصل از مدل استنباطی، یک سری از نقشه‌های تابع عضویت فازی با فرمت رستری است (۲۵). الگوریتم استنباط در مدل SIE از ۹ تابع P, E, T تشکیل شده و به شکل زیر است:

$$S_{ij,k} = T_k \{P_c [E_{c,a} (Z_{ij,a}, Z_{c,a})]\} \quad [2]$$

در این رابطه، مقدار تابع عضویت فازی در مکان ij برای خاک k، T_k تابع تعیین مقدار تابع عضویت فازی برای خاک k در مکان ij براساس تمامی شاهد‌های خاک k، P_c تابع ارزیابی تابع عضویت فازی در سطح شاهد، $E_{c,a}$ تابع ارزیابی مقدار بهینگی در سطح سیمای محیطی، $Z_{ij,a}$ مقدار سیمای محیطی در مکان ij و $Z_{c,a}$ بیشترین دامنه بهینه داده شده توسط شاهد است. SIE ابزاری برای اعتبارسنجی نتیجه، تجزیه و تحلیل

منطقه گلفرج شهرستان جلفا استان آذربایجان شرقی است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۹۰۷۹ هکتار بین عرض‌های شمالی $38^{\circ}51'44''$ تا $38^{\circ}56'8''$ و طول‌های شرقی $45^{\circ}23'50''$ و $45^{\circ}36'26''$ در ۲۰ کیلومتری شهرستان جلفا واقع شده است. (شکل ۱).

بر مبنای داده‌های هواشناسی (۱)، رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه مطالعاتی، زریک و مزیک هستند. سیمای سرزمین در این منطقه، شامل تیپ اراضی کوه‌ها و آبرفت‌های بادبزی شکل سنگریزه‌دار است.

نمونه‌برداری خاک و مطالعات آزمایشگاهی

اطلاعات خاک جمع‌آوری شده از منطقه مطالعاتی، شامل اطلاعات حاصل از تشریح، نمونه‌برداری و نتایج فیزیکی و شیمیایی ۳۷ خاک‌رخ در منطقه گلفرج (شکل ۲) هستند.

تمامی خاک‌رخ‌های حفر شده، بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک‌ها در صحرا (۲۲ و ۲۳) تشریح شدند و مطابق با کلید رده‌بندی آمریکایی خاک (۲۸) طبقه‌بندی شدند و در نهایت، از تمامی افق‌های ژنتیکی آنها نمونه‌برداری انجام گرفت. سپس، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز شامل درصد ذرات درشت، واکنش خاک، گل اشباع، هدایت الکتریکی عصاره اشباع، بافت خاک و اجزای آن، میزان کل کربنات‌ها، درصد ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بر اساس روش‌های استاندارد روی نمونه‌ها انجام گرفت (۲۰) و در پایان، رده‌بندی تمامی خاک‌رخ‌ها تا سطح فامیل خاک، بر اساس نتایج آزمایشگاهی و مطابق با کلید رده‌بندی آمریکایی خاک (۲۸)، نهایی شد.

تهیه داده‌های رقومی و پردازش آنها

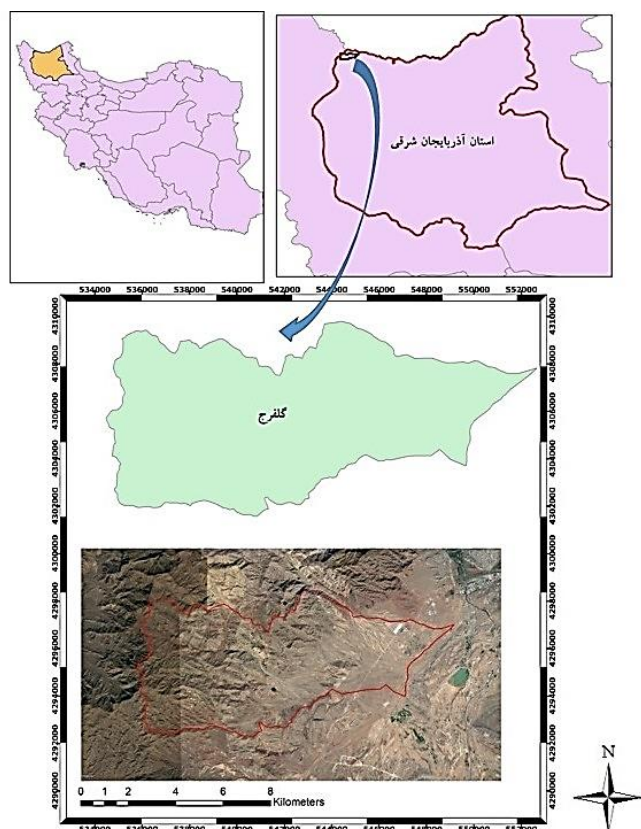
به منظور ایجاد لایه‌های رقومی ورودی مدل، لایه رستری مدل

زمین، قبل و بعد از پردازش داده‌های رستری برای تبدیل فرمت اطلاعات فراهم می‌کند (۲۵).

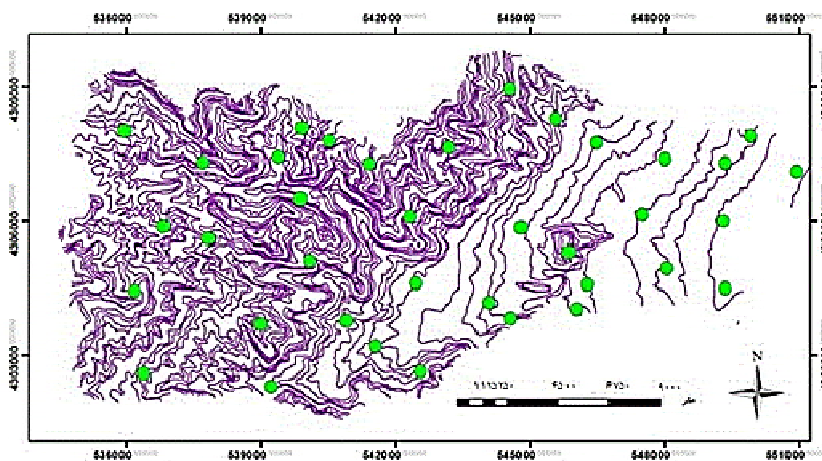
شی و همکاران (۲۵) با استفاده از مدل SIE، نقشه رقومی خاک را با استفاده از سیمای محیطی مانند ارتفاع، درجه شیب و ... اعمال استدلال‌های شاخص پایه و مورد پایه برای یک حوضه آبخیز به‌عنوان واحد کاری تهیه کردند. نتایج حاصل از مقایسه نقشه تولیدی مدل SIE و نقشه سنتی، بیانگر کیفیت و دقت قابل قبول نقشه رقومی تولید شده توسط مدل بود.

سورغالی و همکاران (۲) در پژوهش خود، نقشه رقومی خاک حوضه آبخیز پل هرو واقع در استان لرستان را با استفاده از مدل استنباط خاک SIE، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی، تولید کردند، همچنین به منظور اعتبارسنجی نقشه رقومی خاک تولیدی، نقشه خاک منطقه به روش سنتی تهیه و ماتریس خطای حاصل از مقایسه دو نقشه را محاسبه کردند و بیان کردند که نتایج حاصل از اعتبارسنجی، درستی کل ۹۵ درصد را نشان می‌دهد که بیانگر کیفیت و درستی قابل قبول نقشه رقومی خاک تولید شده توسط مدل استنباط خاک است.

اسمیت و همکاران (۲۷) نیز با استفاده از مدل SIE، اقدام به تهیه نقشه رقومی خاک منطقه‌ای در جنوب بریتیش کلمبیا کانادا کردند و کیفیت و دقت نقشه رقومی تولید شده توسط مدل را تأیید شده اعلام کردند. در ایران، نقشه‌برداری رقومی خاک توسط محققین متعددی مانند اسفندیار پور و همکاران (۵)، جعفری و همکاران (۸ و ۹)، تقی‌زاده و همکاران (۲۹) و پهلوان‌راد و همکاران (۱۸)، به ترتیب در منطقه بروجن استان چهارمحال و بختیاری، زرنده استان کرمان، اردکان استان یزد و گرگان استان گلستان برای تهیه نقشه‌های گروه بزرگ خاک به‌کار گرفته شده است، همچنین کمپن و همکاران (۱۰) یانگ و همکاران (۲۵) و پهلوان‌راد و همکاران (۱۸) از تکنیک‌های ماشین یادگیری برای به‌هنگام کردن نقشه‌های خاک موجود منطقه مورد مطالعه استفاده کردند. هدف از پژوهش حاضر، نقشه‌برداری خاک به وسیله دانش کارشناسان و منطق فازی با استفاده از مدل استنباط خاک و اعتبارسنجی نتایج این مدل در



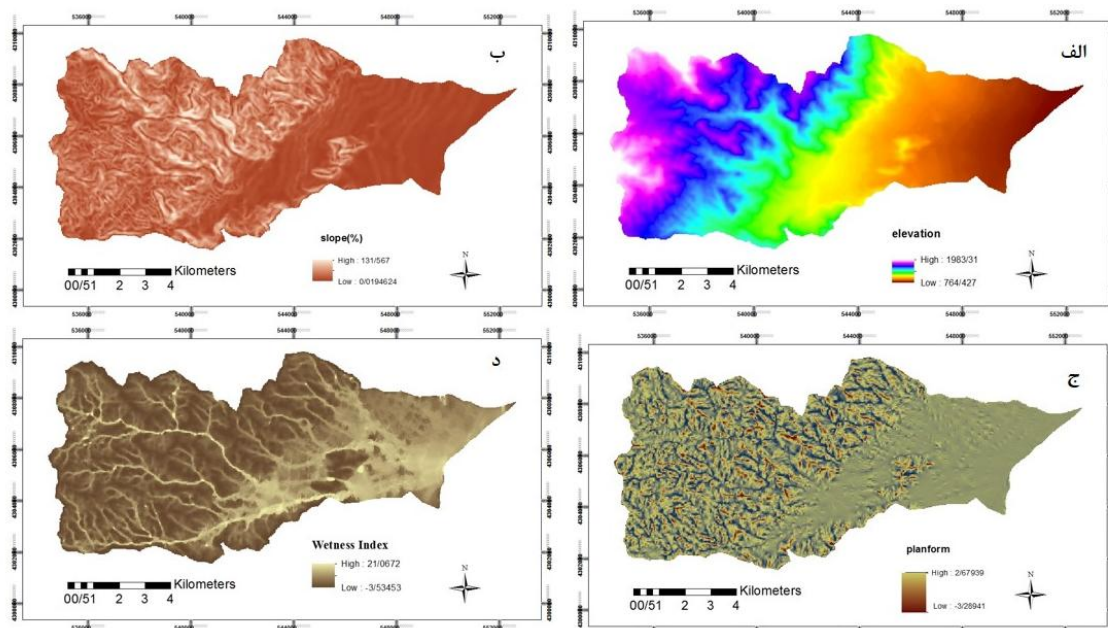
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان جلفا، استان آذربایجان شرقی



شکل ۲. موقعیت خاک‌رخ‌های نمونه‌برداری شده منطقه گلرغ

سازمان زمین‌شناسی کشور، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی تولید شد. در این پژوهش جهت تولید و پردازش لایه‌های مختلف اطلاعاتی از نرم‌افزارهای Arc GIS، نسخه ۱۰/۱ و Arc SIE نسخه ۱۰ استفاده شده است. لایه‌های ورودی

رقومی ارتفاع (DEM) زمین مرجع تولید شده از داده‌های سنجنده استر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، استفاده شده است، همچنین لایه رقومی زمین‌شناسی به‌عنوان یکی از لایه‌های ورودی مدل بر مبنای نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰



شکل ۳. الف) نقشه ارتفاع، ب) درجه شیب بر حسب درصد، ج) شکل انحنا سطح زمین و د) شاخص خیزی منتج شده از مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه توسط مدل SIE

می‌شود که در مقایسه با الگوریتم تک مسیر شاخص خیزی که نشان دهنده جریان در بالاترین جهت است، نتایج بهتری ارائه می‌کند. قوانین نهایی در جدول (۱) نشان داده شده است، شکل (۴) نمونه‌ای از رابط استنتاج را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تابع عضویت است.

تابع عضویت فاکتور محدود کننده ArcSIE با استفاده از متغیرهای کمکی زیست‌محیطی و متغیرهای شکل زمین برای پی بردن به نوع خاک است. تابع فاکتور محدود کننده، پیکربندی زیست‌محیطی در یک محل خاص را برای سری‌های خاک باهم مقایسه می‌کند و حداقل مقدار بهینگی در میان متغیرهای کمکی با ارزش بهینه کلی را برای آن مکان انتخاب می‌کند. مدل ArcSIE برای پنج تیپ خاک، یک تابع عضویت فازی شبکه‌ای (رستری) برای هر کدام از انواع خاک ارائه می‌کند. هر پیکسل از این توابع عضویت فازی، عددی بین صفر تا صد را به خود اختصاص می‌دهد. نقشه‌های تابع عضویت فازی ایجاد شده غیر فازی می‌شوند. در طی فرایند غیر فازی کردن، خاک با مقادیر بیشینه تابع عضویت فازی در یک موقعیت مکانی

مدل SIE، لایه رقومی زمین‌شناسی و لایه‌های محیطی منتج شده از مدل رقومی ارتفاع شامل: ارتفاع، شیب، شکل انحنا سطح زمین و شاخص خیزی هستند (شکل ۳).

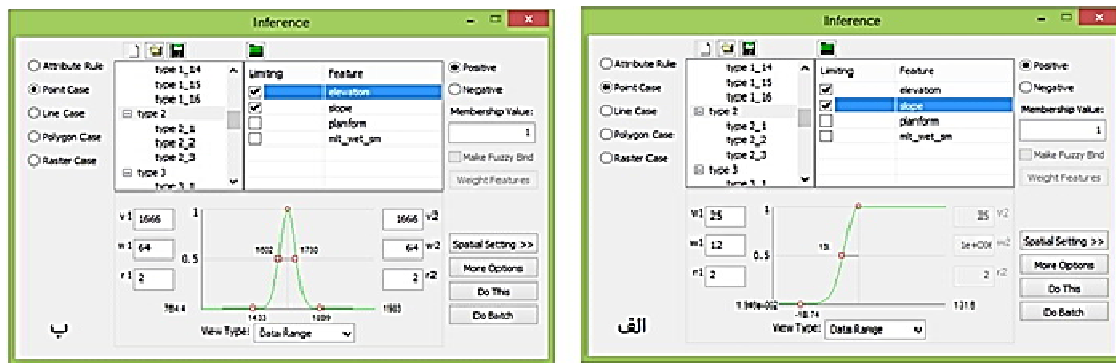
از ویژگی‌های زمین تولید شده (شیب و شاخص خیزی) به وسیله SIE، استفاده شد. به منظور تولید لایه‌های عوارض سطحی (مانند لایه درجه شیب و شکل انحنا سطح) اندازه همسایگی ۳۰ متر و به منظور محاسبه از الگوریتم ایوانز - یانگ استفاده شد (۱۹). شاخص خیزی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$[3] \quad WI = \ln(\text{درجه شیب/جریان تجمعی})$$

در این رابطه، WI شاخص خیزی است که از با در دست داشتن جریان تجمعی و درجه شیب محاسبه می‌شود. در این مطالعه با استفاده از DEM ورودی اصلاح شده، الگوریتم چند مسیر شاخص خیزی محاسبه شد (۲۵). الگوریتم چند مسیر بیان می‌کند که آب می‌تواند در تمامی پیکسل‌های پست‌تر مجاورش جریان یابد و توزیع مقدار آب پیکسل‌های پست‌تر توسط درجه شیب بین آن پیکسل‌ها و پیکسل مرکزی تعیین

جدول ۱. قوانین برای خاک‌های نوع یک تا پنج

نام خاک	عضویت کامل		شکل منحنی		تابع P	
	شیب (%)	ارتفاع (m)	شیب (%)	ارتفاع	شیب (%)	ارتفاع
خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)	۲۵	۱۷۰۰	Bell-shape	Bell-shape	Limiting Factor	Limiting Factor
خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)	۲۵	۱۶۶۶	Bell-shape	S-shape	Limiting Factor	Limiting Factor
خاک نوع سه (Calcic Haploxerepts)	۲۰	۱۲۱۸	Bell-shape	S-shape	Limiting Factor	Limiting Factor
خاک نوع چهار (Typic Calcixerepts)	۸	۹۵۸/۳	Bell-shape	Z-shape	Limiting Factor	Limiting Factor
خاک نوع پنج (Typic Xerorthents)	۵	۹۰۸/۹	Bell-shape	Z-shape	Limiting Factor	Limiting Factor



شکل ۴. رابط استنتاج ArcSIE برای خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts). الف) منحنی S-shape برای شیب و ب) منحنی Bell-shape برای ارتفاع

$$O.A = \frac{\sum_{i=1}^c E_{ii}}{N} \quad [4]$$

در این رابطه، c تعداد کلاس‌ها، N تعداد کل پیکسل‌های معلوم، E_{ii} اعضا قطری ماتریس خطا و O.A. دقت کلی طبقه‌بندی است. به منظور اعتبارسنجی نقشه تولیدی توسط مدل استنباط خاک (SIE)، با استفاده از نرم‌افزار ایلویس ماتریس خطای انطباق نقشه رقومی حاصل از مدل و نقشه مرسوم محاسبه شد. در این مقایسه، پیکسل‌های متناظر مکانی دو نقشه با یکدیگر مقایسه می‌شوند به همین دلیل ابعاد پیکسل‌ها در دو نقشه باید یکسان باشد و هر دو نقش، زمین مرجع باشند.

نتایج و بحث

جدول (۲) نشانگر نتایج رده‌بندی هفت فامیل خاک غالب موجود در منطقه مطالعاتی است. نتایج این جدول، نمایانگر این است

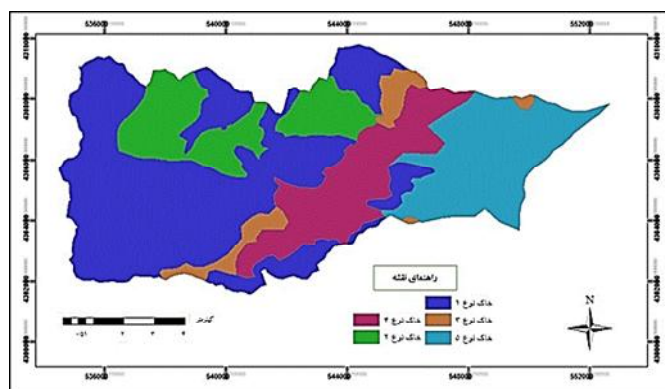
به‌عنوان خاک آن موقعیت مکانی انتخاب می‌شود.

فرایند غیر فازی کردن چندین نقشه، تابع عضویت فازی مربوط به خاک‌های مختلف را تبدیل به یک نقشه شبکه‌ای (رستری) می‌کند که در آن نقشه خروجی هر پیکسل تنها متعلق به یک نوع خاک است. نقشه خروجی دارای ناخالصی‌هایی با مساحت‌های کوچک است، از این رو به منظور حذف این ناخالصی‌ها از نقشه، ابزار حذف مورد استفاده قرار گرفت.

ارزیابی نتایج نهایی مدل ArcSIE از طریق محاسبه صحت کلی نقشه انجام گرفت. صحت کلی نقشه، نشان دهنده آن است که تا چه اندازه مشاهدات یا طبقات جدا شده، صحیح هستند (۲۱)، به عبارت دیگر، چه تعداد از نمونه‌ها به درستی در طبقات مربوط جای گرفته‌اند. این ویژگی، با تشکیل ماتریس خطا توسط مدل SIE و نقاط کنترلی و براساس رابطه (۴) قابل محاسبه است (۱۲ و ۲۱).

جدول ۲. رده‌بندی واحدهای خاک منطقه گلفرج

شماره پروفیل	رده‌بندی بر اساس طبقه‌بندی خاک آمریکایی			فائو
	فامیل خاک	زیرگروه	رده	
۳,۱۱	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۵	Coarse loamy, mixed, mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۹	Coarse loamy, mixed, mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۱,۲	Fine loamy, mixed(calcareous), mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۱۷,۱۸,۱۹	Fine loamy, mixed, mesic,	Lithic Haploxerepts	Inceptisols	Leptic Cambisols
۶,۱۳,۱۰,۸	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۴,۷,۱۵,۱۶,۱۴	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۱۲	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic,	Lithic Xerorthents	Entisols	Eutric Leptosols
۲۱,۲۰,۲۲,۲۳,۲۴	Fine loamy, mixed(calcareous), mesic,	Typic Calcixerepts	Inceptisols	Haplic Calcisols
۲۹,۲۸,۲۷,۲۶,۲۵	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic,	Calcic Haploxerepts	Inceptisols	Calcic Cambisols
۳۷,۳۶,۳۵,۳۳,۳۰,۳۴,۳۱,۳۲	Coarse loamy, mixed(calcareous), mesic	Typic Xerorthents	Entisols	Eutric Regosols



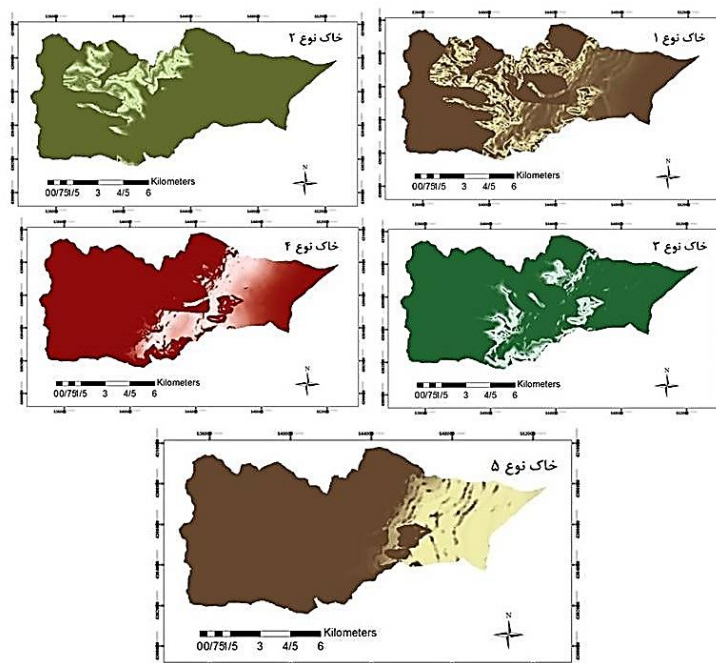
شکل ۵. نقشه مرسوم انواع خاک‌های منطقه مورد مطالعه خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)، خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)، خاک سه (Calcic Haploxerepts)، خاک چهار (Typic Calcixerepts) و خاک نوع پنج (Typic Xerorthents)

نقشه انواع خاک تهیه شد که همان روش مرسوم تهیه نقشه خاک (شکل ۵) است.

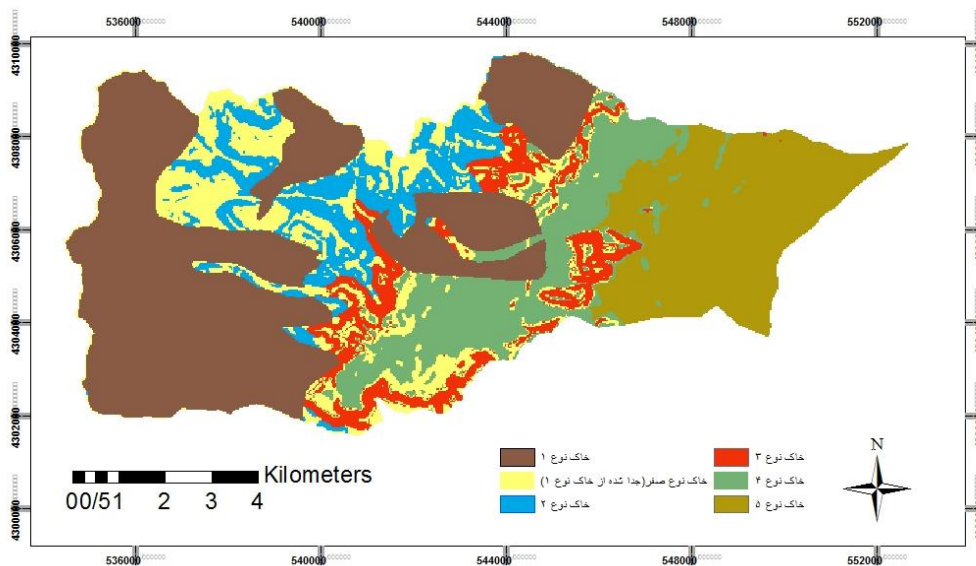
نقشه‌های خروجی اولیه مدل SIE نتایج فازی برای هر سری خاک را نشان می‌دهد (شکل ۶). در هر یک از این نقشه‌ها، رنگ تیره‌تر به معنی عضویت فازی بالاتر برای خاک است. نقشه پیش‌بینی نهایی (شکل ۷) برای منطقه مورد مطالعه نقشه غیر فازی، نتایج SIE است.

که پنج زیرگروه Lithic Xerorthents, Typic Xerorthents, Lithic Haploxerepts و Calcic Haploxerepts زیرگروه‌های غالب منطقه هستند.

براساس مطالعات انجام گرفته ستادی و صحرایی که براساس تفسیر عکس‌های هوایی، نقشه توپوگرافی منطقه، نقشه زمین‌شناسی و نیز انطباق آنها با پیمایش صحرایی انجام گرفت، در حوضه گلفرج، پنج تیپ خاک تشخیص و بر این اساس



شکل ۶. نقشه پیش‌بینی فازی برای خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)، خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)، خاک نوع سه (Calcic Haploxerepts)، خاک نوع چهار (Typic Calcixerepts) و خاک نوع پنج (Typic Xerorthents) در منطقه مورد مطالعه



شکل ۷. نقشه پیش‌بینی نهایی (HARDEN) منطقه مورد مطالعه

آمده به‌طور قابل‌توجهی قدرت تفکیک مکانی، توزیع و پیچیدگی سری‌های خاک، بیشتر از اشغال موقعیت‌های توپوگرافی در زمین‌نما است. خاک نوع یک در نقشه پیش‌بینی

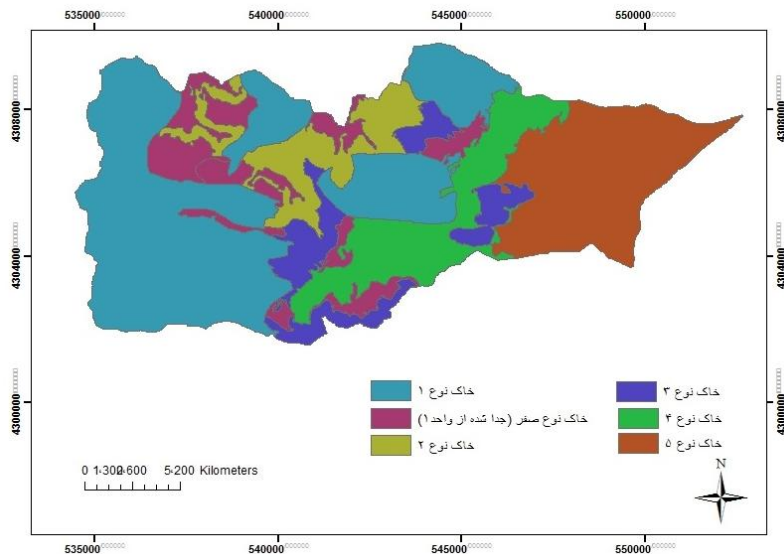
نقشه رقمی سری‌های خاک که به‌وسیله غیر فازی کردن ایجاد شده‌اند، کلاس‌های با بالاترین مقادیر عضویت فازی برای هر ۳۰ متر واحد سلول را به تصویر می‌کشند. در نتایج به‌دست

جداسازی واحدهای خاک است. اعتبارسنجی نقشه استخراج شده از مدل SIE با استفاده از نقاط کنترلی منطقه مورد مطالعه، صحت نقشه رقومی این مدل با توجه به جدول ماتریس خطا که توسط Arc SIE محاسبه شده، برابر ۷۵ درصد است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده کیفیت و صحت نقشه رقومی خاک است (جدول ۳) که با نتایج شی و همکاران (۲۴) و سورغالی و همکاران (۲) مطابقت دارد. آنها، بیان کرده بودند، نتایج حاصل از مقایسه نقشه تولیدی مدل SIE و نقشه سنتی، بیانگر کیفیت و دقت قابل قبول نقشه رقومی تولید شده توسط مدل است. خروجی SIE به‌صورت پیکسل یا رستر است و می‌تواند برای کاربران اطلاعات خاک بسیار مفید باشد. در روش مرسوم، نقشه خاک در قالب پلی‌گون ارائه می‌شود که هر پلی‌گون براساس واحد نقشه با یک یا دو نوع خاک نشان‌دار می‌شود و کاربر باید برای پیدا کردن خاک‌های متعدد دیگری که در پلی‌گون وجود دارند به فراداده نگاهی بیندازد. مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر دانش قبلاً با نقشه‌برداری مرسوم خاک مقایسه شده است (۲۴). مقایسه میزان انطباق نقشه رقومی ایجاد شده توسط مدل SIE (شکل ۸) و نقشه مرسوم منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که صحت کلی نقشه‌های تهیه شده برابر با ۷۴/۶۸ درصد است و در جدول (۴) آورده شده است. در مطالعه دیگری سورغالی در حوضه آبخیز پل هرو واقع در استان لرستان با استفاده از مدل استنباط خاک SIE در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و اعتبارسنجی نقشه رقومی خاک تولیدی، نقشه خاک منطقه به روش سنتی و ماتریس خطای حاصل از مقایسه دو نقشه بیان کرد که نتایج حاصل از اعتبارسنجی، صحت کل ۹۵ درصد دارد که بیانگر کیفیت و صحت قابل قبول نقشه رقومی خاک تولید شده توسط مدل استنباط خاک (SIE) است. خروجی داده به‌صورت رستری، ایجاد نقشه‌ای که نمایانگر یک توزیع پیوسته که اصطلاحاً شمول خاک با واحدهای نقشه نامیده می‌شود را آسان‌تر می‌کند. صحت و دقت داده‌های رستری خاک به صحت و دقت داده‌های ورودی از قبیل DEM بستگی دارد (۱۲). یک مدل مبتنی بر دانش مانند، SIE، پتانسیل پیش‌بینی خواص مستمر خاک را دارد.

نهایی (HARDEN) توسط مدل SIE به دو قسمت بانام‌های خاک نوع صفر و نوع یک تقسیم شد. مرز تفکیک نوع یک و نوع صفر توسط لایه زمین‌شناسی ایجاد شد؛ زیرا در قسمت خاک نوع یک که در نقشه‌های سنتی مشخص شده است لایه‌های زمین‌شناسی متفاوتی وجود دارد، اما در روش‌های مرسوم تهیه نقشه خاک، بیشتر تابع توپوگرافی و واحدهای همگن در عکس‌های هوایی است. محدودیت‌های ارتفاعی اعمال شده در سری‌های خاک در برخی از باندهای ارتفاعی سری‌های خاک مشهود است. مقایسه اولیه بین نقشه نهایی پیش‌بینی شده و نقشه مرسوم سری‌های خاک نشان می‌دهد، نتایج به‌دست آمده به‌طور قابل توجهی وابسته به موقعیت منطقه در حوضه هستند. جدول (۳) مقایسه ماتریس خطا نقشه HARDEN حاصل از مدل SIE براساس سطح زیرگروه، برای تمامی خاک‌رخ‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. و صحت کلی نقشه استخراج شده از مدل، برابر ۷۵ درصد است که به‌خاطر تنوع شیب و ارتفاع در خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)، قسمتی از این خاک را در یک گروه جدید به نام خاک نوع صفر جای داده است که در روش مرسوم تهیه نقشه خاک، خاک‌رخ‌های مربوط به آن در قسمت خاک نوع یک طبقه‌بندی شده است، اما مدل SIE چون براساس ارتباط بین خاک - محیط است، این خاک‌ها را از هم جدا کرده است. در نقشه ایجاد شده براساس مدل SIE، چون ویژگی‌های مؤثر در خاک‌سازی هر منطقه یعنی فاکتورهایی چون شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی و لند فرم را مدنظر قرار داده است و براساس میزان تأثیر این فاکتورها واحدهای خاک را جداسازی کرده، واحدها به‌صورت جزئی‌تر در قسمت‌های مختلف براساس تفاوت‌هایی که شیب و ارتفاع و حتی زمین‌شناسی آن قسمت‌ها باهم دارند، جداسازی شده‌اند، اما در تهیه نقشه مرسوم که براساس نقشه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی واحدهای خاک جدا می‌شوند و شیب و ارتفاع به‌عنوان یک عامل مهم در نظر گرفته نمی‌شود، واحدهای خاک به‌صورت کلی‌تر جدا می‌شوند و به این دلیل است که نقشه ایجاد شده از مدل SIE، دارای دقت بالاتری در

جدول ۳. ماتریس خطا نقشه رتومی حاصل از مدل SIE براساس سطح زیرگروه برای تمامی خاک‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از Arc SIE

دقت کاربر	کل	خاک نوع پنج	خاک نوع چهار	خاک نوع سه	خاک نوع دو	خاک نوع یک	خاک نوع یک	خاک نوع یک	استنباط شده مشاهده شده
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	خاک نوع ۰
۶۰	۱۶	۰	۰	۰	۰	۶	۹	۰	خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)
۱۰۰	۳	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)
۶۰	۵	۰	۰	۳	۰	۲	۰	۰	خاک نوع سه (Calcic Haploxerepts)
۱۰۰	۵	۰	۵	۰	۰	۰	۰	۰	خاک نوع چهار (Typic Calcixerepts)
۱۰۰	۸	۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	خاک نوع پنج (Typic Xerorthents)
	۳۷	۸	۵	۳	۳	۱۸	۰	۰	کل
	۷۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۵	۰	۰	دقت تهیه کننده
			۷۵ درصد						صحت کل



شکل ۸. نقشه نهایی وکتور شده منطقه مطالعاتی با استفاده از مدل SIE برای خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)، خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)، خاک نوع سه (Calcic Haploxerepts)، خاک نوع چهار (Typic Calcixerepts) و خاک نوع پنج (Typic Xerorthents)

جدول ۴. ماتریس خطای انطباق نقشه‌های حاصل از روش مرسوم و مدل SIE (برحسب پیکسل) با استفاده از نرم‌افزار ILWIS

صحت کل	طبقه‌بندی نشده	خاک نوع					استنباط شده مشاهده شده
		پنج	چهار	سه	دو	یک	
۰/۷۵	۱۱۷۹۳۴	۰	۷۵۳۰	۶۵۳۷	۱۴۹۵۵	۸۸۹۱۲	خاک نوع یک (Lithic Xerorthents)
۰/۷۳	۲۰۵۰۳	۰	۰	۰	۱۴۹۶۴	۵۵۵۷	خاک نوع دو (Lithic Haploxerepts)
۰/۰۹	۱۸۸۸۵	۰	۸۶۴	۳۶۷	۱۷۵۴	۳۳۷۲	خاک نوع سه (Calcic Haploxerepts)
۰/۸۹	۲۸۱۴۹	۰	۱۰۵۱	۲۵۰۵۵	۱۰۸۶	۹۵۷	خاک نوع چهار (Typic Calcixerepts)
۰/۹۴	۴۱۴۷۷	۰	۳۸۸۲۶	۱۹۵۰	۶۳۳	۶۸	خاک نوع پنج (Typic Xerorthents)
	۲۲۶۹۴۸	۰	۴۰۷۴۱	۳۴۹۰۲	۱۰۰۱۰	۳۳۲۷۳	کل
		۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۸۲	قابلیت اطمینان
			درصد ۷۴/۶۸				صحت کل

نتیجه گیری

بیشتر به منظور بررسی مسئله پیش‌بینی خواص مستمر خاک مورد نیاز است. در این مطالعه نیز محدودیت‌های منطقه مورد مطالعه با دانش کارشناسی تعیین شده، آستانه‌های مورد نیاز توابع مشخص شده و نقشه رقومی خاک با درصد صحت قابل قبولی به دست آمده است. مهم‌ترین قسمت در مدل SIE همان شناسایی محدودیت‌ها و آستانه‌ها است.

استفاده از ArcSIE، مدیریت مؤثر داده‌ها و ارائه یک رویه

ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل مبتنی بر دانش منطق فازی مدل‌سازی شده است. مدل ویژگی‌های خاک می‌تواند مفهومی شود و لایه‌های داده‌های زیست‌محیطی در دسترس، اجازه انتقال این دانش به مدل و استنتاج را فراهم می‌کنند. با این حال، SIE به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی ویژگی‌های خاک آزمایش نشده است، بنابراین تحقیق و توسعه

کاربرپسند برای مدل‌سازی استنتاج را فراهم می‌کند. مشاهده‌های به دست آمده، حاصل تلاش‌هایی برای جداسازی دقیق توسط مدل استنتاج است که به تابع استنتاج استفاده شده (فاکتور محدود کننده یا متوسط وزن دهی) و حتی تنظیم وزن جزئی با کوواریانت متغیرهای ورودی بسیار حساس است. هیچ رویکرد واحدی در کل منطقه مورد مطالعه، بهتر از تأیید مفهوم چندگانه قوانین براساس معیارهای زیست‌محیطی کار نمی‌کند. مقیاس ورودی و یا درجه پستی و بلندی برای تنظیم دقیق خروجی‌ها مورد نیاز هستند. 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 چهار ویژگی از مدل رقومی ارتفاع و اطلاع از خاک‌های غالب منطقه بدون هیچ‌گونه اطلاعات دیگر، می‌توان برآورد درستی از نقشه رقومی خاک در سطح زیرگروه خاک با دقت حدود ۷۵ درصد به دست آورد.

منابع مورد استفاده

۱. بنایی، م. ح. ۱۳۷۷. نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور. تهران.
۲. سورغالی، م. ۱۳۹۲. شناسایی و تهیه نقشه رقومی خاک با تلفیق داده‌های طیفی و ارتفاعی مبتنی بر منطق فازی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه لرستان.
۳. علوی‌پناه، س. ک. ح. ر. متین‌فر و ع. رفیعی امام. ۱۳۸۷، کاربرد فناوری اطلاعات در علوم زمین (خاکشناسی رقومی)، انتشارات دانشگاه تهران. تهران
4. Cook, S. E., R. J. Corner, G. Grealish, P. E. Gessler and C. J. Chartress. 1996. A rule-based system to map soil properties. *Soil Science Society of America Journal* 60:1893-1900.
5. Esfandiarpour Borujeni, I., J. Mohammadi, M. H. Salehi, N. Toomanian and R. M. Poch. 2010. Assessing geopedological soil mapping approach by statistical and geostatistical methods: A case study in the Borujen region, Central Iran. *Catena* 82: 1-14.
6. Grunwald, S. 2006. Environmental Soil-Landscape Modeling, Geomorphic Information Technologies and Pedometrics. Taylor and Francis, New York.
7. Grunwald, S. 2006. What do we really know about the space-time continuum of soil- landscapes. PP: 3-36. In: Environmental Soil Landscape Modeling, Geographic Information Technologies and Pedometrics. Taylor and Francis, New York.
8. Jafari, A., S. Ayoubi, H. Khademi, P. A. Finke and N. Toomanian. 2013. Selection of a taxonomic level for soil mapping using diversity and map purity indices: a case study from an Iranian arid region. *Geomorphology* 201: 86-97.
9. Jafari, A., P. A. Finke, J. Van deWauw, S. Ayoubi and H. Khademi. 2012. Spatial prediction of USDA- great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science* 63: 284-298.
10. Kempen, B., D. J. Brus and G. B. M. Heuvelink. 2012. Soil type mapping using the generalized linear geostatistical model: a case study in a Dutch cultivated peatland. *Geoderma* 189: 540-553.
11. Kempen, B., D. J. Brus, G. B. M. Heuvelink and J. J. Stoorvogel. 2009. Updating the 1:50 000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. *Geoderma* 151: 311-326.
12. Legros, J. P. 2006. Mapping of the Soil. Science Publishers, NH, USA.
13. Luo, Y. M., Z. G. Li, L. H. Wu, S. C. Wu, G. L. Zhang, S. L. Zhou, Y. G. Zhao, Q. G. Zhao, M. H. Wong. and H. B. Zhang. 2007. Hong Kong Soils and Environment (in Chinese). Science Press, Beijing.
14. McBratney, A. B. 2006. Background to digital soil mapping. In: Proceeding of the International Working Group on Digital Soil Mapping. Retrieved April 23, 2007 from http://www.digitalsoilmapping.org/DSM_Background.html. Pedometrics. Taylor and Francis.
15. McBratney, A. B., M. L. Mendonca-Santos and B. Minasny. 2003. on digital soil mapping. *Geoderma* 117:30-52.
16. McKay, J, S. Grunwald, X. Shi and R. F. Long. 2010. Evaluation of the transferability of a knowledge-based soil-

- Landscape model. *Digital Soil Mapping Progress in Soil Science* 2: 165-178
17. McKay, J. 2008. Using a knowledge-based system to test the transferability of a soil-landscape model in northeastern Vermont. MSc. Thesis, University of Florida, Gainesville, FL.
 18. Pahlavan Rad, M. R., N. Toomanian, F. Khormali, C. W. Brungard, C. B. Komaki and P. Bogaert. 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma* 232-234: 97-106.
 19. Pennock, D. J., B. J. Zebarth and E. Dejong. 1987. Landform classification and soil distribution in Hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma* 40: 297-315.
 20. Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. PP. 933-951. In: A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part II* 2nd, Agronomy Monograph. ASA, Madison, WI.
 21. Rossiter, D. G. 2000. Methodology for Soil Resource Inventories, 2nd Revised Version, Soil Science Division, International Institute for Aerospace Survey & Earth Science (ITC). Enschede the Netherlands.
 22. Schoeneberger, P. J., D. A. Wysocki, E. C. Benham and W. D. Broderson. 2002. Field Book for Describing and Sampling soils, Version 2.0. (No. 631.47). National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service.
 23. Scull, P. R. 2002. Predictive soil mapping in the Mojave Desert of California. PhD. Thesis. University of California, San Diego State University.
 24. Shi, X., A. X. Zhu, J. E. Burt, F. Qi, and D. Simonson. 2004. A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Science Society of America Journal* 68: 885-894.
 25. Smith, S., C. Bulmer, E. Flager, G. Frank and D. Filatow. 2010. Digital soil mapping at multiple scales in British Columbia, Canada. In: *Proceeding of the 4th Global Workshop on Digital Soil Mapping, Rome, Italy*.
 26. Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy* (11th Ed). NRCS, USDA, USA
 27. Taghizadeh-Mehrjardi, R., B. Minasny, A. B. McBratney, J. Triantafyllis, F. Sarmadian and N. Toomanian. 2012. Digital soil mapping of soil classes using decision trees in central Iran. *Digital Soil Assessments and Beyond*. In: *Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping, Sydney, Australia*.
 28. Zhu, A., B. Hudson, J. Burt, K. Lubich. and D. Simonson. 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1463-1472.

Evaluation of Soil Inference Model (SIE) in Soil Mapping with Emphasis on Using Expert Knowledge and Fuzzy Logic (Jolfa City-Golfaraj)

A. Fariabi* and H. Matinfar¹

(Received: April 7-2015 ; Accepted: October 24-2017)

Abstract

One of the problems with the traditional mapping of soils is the expert's opinion, its time-consuming and timely preparation, and the updating of the maps. While digital soil mapping, using different soil-earth models leads to the simplification of the complexity of the soil system. The purpose of this study was to investigate Soil-Environment Inference (SIE) in soil mapping with an emphasis on using the expert knowledge and fuzzy logic. For this purpose, the digital layer of geology and peripheral layers were derived from a digital elevation model including elevation, slope, and curvature of the ground surface, and auxiliary index, which comprised the input data of the SIE model. Then, the fuzzy maps prepared for the five soil types and the final map of soil prediction were created by hardening. The results showed that the SIE model, which used environmental variables, had a high ability to isolate soil types with more detailed compositions of soils with different maternal materials. The comparison of the error matrix showed that the overall accuracy of the derived map of the SIE model was equal to 75%, and the matching of the digital mapping results with conventional mapping accounted for 74.71% of the results. The difference in the compliance rate could be attributed to the difference in the nature of the two methods.

Keywords: Digital soil mapping, Digital elevation model, Fuzzy logic, SIE model

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Lorestan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: azarfariabi@gmail.com