

پیش‌بینی مکانی واحدهای خاک در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی در اراضی سیوان استان ایلام

زیبا مقصودی¹، محمود رستمی‌نیا¹، مرزبان فرامرزی، علی کشاورزی و اصغر رحمانی

دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام؛ s_maqsodi@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام؛ m.rostaminia@gmail.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام؛ m.faramarzi@ilam.ac.ir

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران؛ alikeshavarzi@ut.ac.ir

دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران؛ a.rahmani@ut.ac.ir

دریافت: 97/8/27 و پذیرش: 97/12/18

چکیده

محدودیت‌های موجود در روش‌های مرسوم شناسایی خاک و پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری اطلاعات، باعث شده تا توجه بیشتری به رویکردهای نوین نقشه‌برداری خاک برای افزایش خلوص نقشه‌های خاک صورت گیرد. هدف این رویکرد پیش‌بینی کلاس‌های خاک یا ویژگی‌های آن، بر اساس متغیرهای محیطی یا خصوصیات از خاک است که به سادگی قابل محاسبه هستند. پژوهش حاضر در اراضی بخش سیوان از شهرستان ایلام با هدف شناسایی و تهیه نقشه خاک‌های این منطقه صورت پذیرفته است. ابتدا موقعیت 46 خاکرخ با استفاده از تفسیر اولیه تصاویر ماهواره‌ای و روش مطالعه شناسایی آزاد مشخص گردید. سپس بر اساس مشخصات مورفولوژیکی هر خاکرخ، نمونه‌برداری از کلیه افق‌های زنتیکی و تجزیه‌های شیمیایی و فیزیکی لازم انجام گرفت. خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (2014) طبقه‌بندی گردید. در این مطالعه از مدل رگرسیون منطقی چندجمله‌ای برای پیش‌بینی مکانی کلاس‌های رده‌بندی خاک استفاده شد. ویژگی‌های پستی و بلندی اولیه و ثانویه زمین از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی 30 متر با استفاده از نرم‌افزار ساگا استخراج شد. نتایج رده‌بندی خاکرخ‌ها نشان داد که خاک‌های منطقه در سه رده مالی‌سولز، اینسپتی‌سولز و انتی‌سولز و شش کلاس در سطح خانواده خاک بود. بررسی همبستگی بین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع نشان داد که پارامترهای موقعیت شیب میانی، تابش خورشیدی پراکنده، شاخص رطوبت پستی بلندی، شاخص زبری زمین، خمیدگی شکل سطح، خمیدگی طولی بیشترین تأثیر را روی تشکیل کلاس‌های خانواده خاک داشتند. دقت کلی مدل رگرسیون برای کلاس‌های خانواده 0/60 به دست آمد. هم‌چنین ضریب کاپای نقشه‌ی پیش‌بینی مکانی در سطح خانواده 0/38 برآورد گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که متغیرهای زمین ریخت سنجی در پیش‌بینی کلاس‌های خاک مؤثر واقع شدند و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از سایر متغیرهای محیطی مشتق از داده‌های سنجش از دور نیز به منظور ارتقا صحت نقشه‌های خاک استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: نقشه‌برداری رقومی خاک، روش رگرسیون منطقی، داده کاوی، متغیرهای محیطی.

¹ نویسنده مسئول، آدرس: ایلام - دانشگاه ایلام - دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب و خاک

مقدمه

نقشه‌برداری خاک همواره بعنوان یک راهنمای مناسب در مدیریت اراضی کشاورزی مورد نیاز می‌باشد، اما بر اساس آمارها حدود 75 درصد خاک‌های ایران دارای کمبود اطلاعات شناسایی دقیق (1/25000) می‌باشند (روزیطلب و همکاران، 2018). بر اساس پیش‌زمینه تحقیقات خاک در ایران ما به زمان بسیار زیادی برای مطالعه همه خاک‌های ایران نیاز داریم. علاوه بر این بسیاری از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده سطحی و عمقی خاک بدلیل تغییرات خاک‌ها در طی سال‌های متمادی به دلیل اعمال شیوه‌های مدیریتی متفاوت بر روی اراضی، وقوع فرسایش، شور شدن و تغییر سطح آب‌های زیرزمینی نیازمند به روزرسانی می‌باشند (پهلوان‌راد و همکاران، 2016). مک‌برتنی و همکاران (2003)، با مروری بر مدل‌های مختلف تخمین و برآورد مکانی خاک و با توجه به اهمیت علوم ریاضی و آمار در انتخاب متغیرهای محیطی مناسب در تهیه نقشه خاک‌ها اقدام به ارائه‌ی یک چارچوب تعمیم‌یافته برای تخمین و برآورد مکانی خاک نمودند؛ چارچوبی که بعدها تحت عنوان نقشه‌برداری رقومی خاک نامیده شد. آنان با دخیل نمودن موقعیت مکانی و دیگر مشخصه‌های خاک، اقدام به بسط و توسعه مدل چند فاکتوری ینی، به منظور برآورد و تخمین یک مشخصه خاک یا کلاس خاک نمودند.

یکی از تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک، روش رگرسیون منطقی می‌باشد که با ایجاد مدل منطقی، احتمال حضور یک کلاس خاک معین را پیش‌بینی می‌کند. این مدل احتمال حضور یک کلاس خاک را به متغیرهای پیش‌بینی کننده ارتباط می‌دهد. در مدل منطقی چند-جمله‌ای، متغیر وابسته دارای چند کلاس یا طبقه است مثلاً کلاس‌های خاک منطقه در این مطالعه، در اجرای مدل منطقی چند جمله‌ای خانواده خاک به عنوان متغیر هدف می‌باشد که یک متغیر کلاس‌بندی شده است. بنابراین متغیر وابسته (خانواده خاک) دارای بیش از یک سطح است و حل آن به صورت دوتایی امکان پذیر نیست. معادله ریاضی روابط رگرسیون منطقی چندکلاسه به طریق زیر می‌باشد (دبلاگیلو و اتزلملر، 2009). رابطه (1) چگونگی محاسبه‌ی لاجیت را نشان می‌دهد:

$$\text{Logit } ij = \ln \left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = a_j + b_1 j X_1 i + 2j X_2 + \dots + b_n j X_n i \quad (1)$$

ij: logit (لاجیت)، P: مقدار احتمال، i: یک pix (بییکسل)،

j: شماره کلاس، (1-P): عدم وقوع پیش‌بینی
مطالعات متعددی در زمینه نقشه‌برداری رقومی خاک در نقاط مختلف ایران و جهان صورت پذیرفته است.

افشار و همکاران (1395)، در مطالعه‌ای با عنوان نقشه‌برداری رقومی کلاس‌های خاک با استفاده از نقشه خاک قدیمی در جنوب شرق ایران گزارش نمودند که در پیش‌بینی کلاس‌های خاک، سطوح زمین ریخت در بین متغیرهای ورودی دو مجموعه (مجموعه اول، متغیرهای مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع، شاخص‌های سنجش از دور، سطوح زمین ریخت تفکیک شده در منطقه و مجموعه دوم، متغیرهای مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع، شاخص‌های سنجش از دور، سطوح زمین ریخت تفکیک شده و واحدهای خاک شناسایی شده نقشه خاک) بعنوان یک متغیر پیش‌بینی کننده‌ی قدرتمند است. به طور کلی نتایج نشان داد که تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی می‌توانند روش سنتی نقشه‌برداری را ارتقاء بخشند. فاتحی و همکاران (1394)، انبوهش‌زدائی مکانی نقشه‌های سنتی خاک را با استفاده از رگرسیون منطقی چند کلاسه و درختان طبقه‌بندی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که صحت کلی نقشه‌ی پیش‌بینی زیرگروه‌های خاک با روش‌های رگرسیون منطقی و درختان طبقه‌بندی به ترتیب 50 و 47 درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد مدل رگرسیون منطقی تا اندازه‌ای توانایی بیشتری را برای پیش‌بینی زیرگروه‌های خاک داشته است. تقی‌زاده‌ی مهرجردی و همکاران (1393)، در مطالعه‌ای نقشه‌برداری رقومی کلاس‌های خاک را با استفاده از انواع روش‌های داده‌کاوی در منطقه‌ی اردکان انجام دادند.

متغیرهای محیطی که در این پژوهش استفاده شدند، شامل ویژگی‌های توپوگرافی، داده‌های سنجش از دور و نقشه‌های پلی‌گونی از جمله سطوح زمین ریخت شناسی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی است. نتایج نشان داد که مدل درخت تصمیم نسبت به سایر مدل‌ها دارای برتری نسبی است؛ به طوری که توانسته است دقت پیش‌بینی گروه‌های بزرگ خاک را نسبت به روش آنالیز تشخیصی 44 درصد افزایش دهد. در کل نتایج تحقیق، دقت مدل‌های درخت تصمیم، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، ترکیب شبکه‌ی عصبی مصنوعی الگوریتم ژنتیک، رگرسیون منطقی چند جمله‌ای و آنالیز تشخیصی را جهت پیش‌بینی گروه‌های بزرگ خاک با دقت کلی 70، 65، 65، 55 و 47 درصد، به ترتیب تأیید کرد. جیون و همکاران (2018)، با استفاده از مدل رگرسیون منطقی چند جمله‌ای و مدل درختان تصادفی نقشه رقومی کلاس‌های خاک را در غرب هایتی تهیه کردند. در نهایت، نتایج آن‌ها نشان داد که در روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای شاخص کاپا برابر با 0/45 و در روش جنگل تصادفی برابر با 0/42 به دست آمد. در روند اعتبارسنجی مقادیر کاپا برای جنگل تصادفی

2/2 استخراج گردید. معادله‌های محاسبه متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه به شرح زیر بیان شده است. موقعیت نسبی شیب⁵: بیانگر موقعیت یک نقطه نسبت به تیغه‌ها و دره یک شیب می باشد با مقدار صفر برای کف دره و یک برای بالای تیغه (گو و همکاران، 2019).

$$RSP = \frac{Zs - Zy}{Zx - Zy}$$

RSP: موقعیت نسبی شیب، Zs: ارتفاع، Zx: ارتفاع دره و Zy: ارتفاع تیغه می‌باشد.

عمق دره⁶: به صورت اختلاف ارتفاع نسبی به خطوط کانال‌های زهکشی همسایگی (متر) (گو و همکاران، 2019).

$$VD = Zs - Zx$$

VD: عمق دره، Zs: ارتفاع و Zx: ارتفاع دره. ارتفاع نرمال⁷: ارتفاع نرمال شده توسط ارتفاع مناطق شیب‌دار⁸ و عمق دره تعریف می‌شود و مقدار آن از 0 تا 1 متغیر می‌باشد (گو و همکاران، 2019).

$$NH = 0.5 * (1 + SH - VD / SH - VD)$$

NH: ارتفاع نرمال، SH: ارتفاع شیب‌دار و VD: عمق دره. ارتفاع شیب دار: بیانگر اختلاف ارتفاع نسبی نقاط در همسایگی نزدیک قله (متر) (گو و همکاران، 2019). ارتفاع استاندارد⁹: که به صورت حاصلضرب ارتفاع نرمال شده در ارتفاع مطلق تعریف می‌شود.

$$SH = NH * [(Zs - Zmin) - Zmin]$$

SH: ارتفاع استاندارد، NH: ارتفاع نرمال، Zs: ارتفاع و Zmin: حداقل ارتفاع کل منطقه (گو و همکاران، 2019).

موقعیت میانه شیب: شاخصی است که موقعیت شیب در راستای دره و قله را طبقه‌بندی می‌نماید (گو و همکاران، 2019). مبنای محاسبه پارامترهای مورد استفاده، یک پنجره شبکه‌ای 3×3 بر روی مدل رقومی ارتفاعی 30 متری و بر اساس فرمول‌های زیر می‌باشد (شکل 2).

و رگرسیون منطقی به ترتیب مقادیر 0/55 و 0/33 به دست آمد که بر اساس مقادیر کاپا، عملکرد طبقه‌بندی برای هر دو الگوریتم متوسط باشد. اگرچه مطالعات متعددی توسط محققین در زمینه نقشه‌برداری رقومی خاک انجام گرفته‌است. اما هدف از این تحقیق تهیه نقشه خاک‌های منطقه با دقت مناسب در تکمیل استفاده از روش رگرسیون منطقی به عنوان یک مدل ساده در سطح رده‌بندی خانواده خاک برای منطقه مورد مطالعه که از نواحی مستعد و تحت بهره‌برداری کشاورزی در استان ایلام است، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در دهستان میشخاص، بخش سیوان شهرستان ایلام واقع شده است. از نظر موقعیت مکانی حدواسط طول‌جغرافیایی "30° 39' 46" تا "30° 27' 46" شرقی و عرض جغرافیایی "33° 25' 30" تا "33° 39' 33" شمالی قرار گرفته‌است (شکل 1). اراضی مورد مطالعه شامل سه واحد فیزیوگرافی کوهستان، تپه و تراس رودخانه‌ای می‌باشد. منطقه مذکور دارای رژیم رطوبتی زریک¹ و رژیم حرارتی ترمیک² می‌باشد (بنایی، 1377). پوشش گیاهی بومی منطقه شامل خار زرد، کنگر، زالزالک و بلوط می‌باشد و کاربری غالب اراضی منطقه مرتع، کشت دیم گندم و زراعت آبی خیار، گوجه، ذرت، لوبیا و باغ‌های متمر گردو، زردآلو، هلو، انجیر و انگور می‌باشد.

نمونه‌برداری، مطالعات میدانی و انتخاب متغیرهای

محیطی

از تفسیر چشمی تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، نقشه توپوگرافی و بازدیدهای میدانی به منظور تفکیک واحدهای فیزیوگرافی اولیه برای تعیین مناطق نمونه-برداری منطقه صورت گرفت. در مجموع موقعیت 46 خاکرخ بر اساس روش شناسایی آزاد حفر گردید. نمونه-برداری از کلیه خاکرخ‌های حفر شده بر اساس راهنمای تشریح و نمونه‌برداری خاک (2012) انجام شد. بعد از آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی لازم، رده‌بندی خاک‌ها بر اساس سیستم رده‌بندی خاک آمریکایی (2014)، تا سطح فامیل نهایی گردید. در این پژوهش، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی 30 متر، ویژگی‌های اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس³ نسخه 10/2 و ساگا جی‌آی‌اس⁴ نسخه

⁵ Relative slope position

⁶ Valley Depth

⁷ Normal Height

⁸ Slope Height

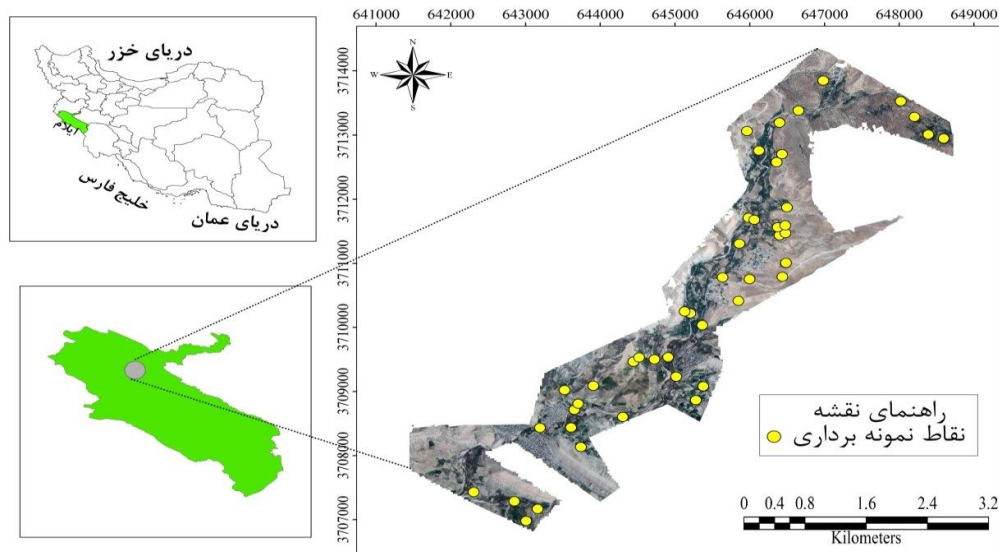
⁹ Standard Height

¹ Xeric

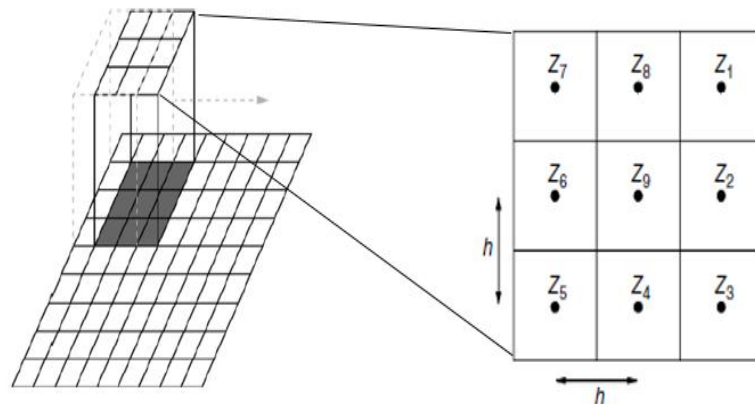
² Thermic

³ ArcGIS 10.2

⁴ Saga-GIS 2.2



شکل 1- موقعیت منطقه مورد مطالعه و خاک‌های مطالعاتی



شکل 2- پنجره متحرک 3x3 برای محاسبه پارامترهای اولیه و ثانویه از مدل رقومی ارتفاع (ویلسون، 2018)

گرادین شیب¹: شدت تغییرات ارتفاع با کاهش تندی شیب (درصد)

SG : گرادین شیب
 $SG = \sqrt{P}$
 جهت شیب²: بیانگر راستای کاهش شیب (درجه)
 $SA = 180 - \arctan\left(\frac{Zy}{Zx}\right) + 90\left(\frac{Zx}{|Zx|}\right)$ جهت شیب SA

خمیدگی خاکرخی³: مقدار تغییرات شیب در جهت بیشترین شیب خطی که شدت تغییرات شیب به سمت

مشتقات اول و دوم سطح مدل رقومی ارتفاع، شدت تغییرات ارتفاع را در پاسخ به تغییرات محلی اندازه‌گیری بر اساس فرمول‌های زیر محاسبه می‌نمایند (شامل x, y) (ویلسون، 2018).

$$Zx = \frac{dz}{dx} = (Z2 - Z6)/2h$$

$$Zy = \frac{dz}{dy} = (Z8 - Z4)/2h$$

$$Zxx = \frac{d^2z}{dx^2} = (Z2 - 2Z9 + Z6)/h^2$$

$$Zyy = \frac{d^2z}{dy^2} = (Z8 - 2Z9 + Z4)/h^2$$

$$Zxy = \frac{d^2z}{dxdy} = (-Z7 + Z1 + Z5 - Z3)/4h^2$$

$$P = Z^2x + Z^2y$$

$$q = p + 1$$

1. Slope gradient
 2. Slope Aspect
 3. Profile Curvature

اعتبارسنجی

در این مطالعه برای ارزیابی صحت از روش اعتباربخشی یا نمونه آزمون استفاده شد. از 75 درصد داده‌ها (35 خاکرخ) برای صحت‌سنجی مدل و از 25 درصد داده‌ها (11 خاکرخ) برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. کلاس‌های پیش‌بینی شده با استفاده از ماتریس خطا که یک جدول توافقی از مقایسه اطلاعات زمینی با اطلاعات تولید شده از طبقه‌بندی است و ارزش عناصر آن ممکن است بر حسب تعداد پیکسل و یا درصد بیان شود. عناصر قطری ماتریس خطا، تعداد یا نسبت پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده را نشان می‌دهد و عناصر غیرقطری نیز پیکسل‌های خطا را نشان می‌دهند. ماتریس خطا یک ماتریس مربع به ابعاد $n \times n$ می‌باشد که در آن n معرف تعداد کلاس‌های موجود در طبقه‌بندی است. پارامترهای استخراج شده از ماتریس خطا شامل صحت کاربر⁶، صحت تولیدکننده⁷ و معیار صحت کلی نقشه⁸ اعتبارسنجی شد (بروس و همکاران، 2011).

$$OA = \sum_{i=1}^n X_{ij} / N$$

در رابطه (2) بترتیب (OA) صحت کلی و N معرف کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده و $\sum_{i=1}^n X_{ij}$ نمایه مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده) می‌باشد. صحت کلی طبقه‌بندی از جمله پارامترهای اندازه‌گیری است که فقط دقت کلی را گزارش می‌نماید و در مورد هر کدام از طبقات به‌طور مجزا اطلاعاتی ارائه نمی‌کند.

شاخص کاپا

$$(3) \quad \sum_{i=1}^n X_{ij} - \sum_{i=1}^n (X_{io} - X_{oi}) / N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{io} - X_{oi})$$

آماره کاپا یک شاخص قوی است که نسبت احتمال حضور یا عدم حضور کلاس‌هایی که به درستی به وسیله مدل پیش‌بینی شدند را محاسبه می‌کند. بنابراین آمار کاپا همیشه کمی کمتر از خلوص نقشه است. دامنه تغییرات آمار کاپا بین صفر تا یک است. آمار کاپا بالاتر از 0/8، 0/4-0/8 و کمتر از 0/4 به ترتیب نشان دهنده توافق قوی، متوسط و ضعیف هستند (جعفری و همکاران، 2012). در

پایین در راستای شیب را نشان می‌دهد (درجه در 100 متر) (ویلسون، 2018).

$$PC = \frac{Z_{xx}Z_{2x} + 2Z_{xy}Z_{xz} + Z_{yy}Z_{2y}}{pq3}$$

PC: خاکرخی

خمیدگی شکل شیب¹: شدت تغییرات جهت شیب در طول یک خط تراز را نشان می‌دهد (درجه در 100 متر) (ویلسون، 2018).

$$SSC = \frac{Z_{xx}Z_{2y} - 2Z_{xy}Z_{xz} + Z_{yy}Z_{2x}}{pq3}$$

SSC: خمیدگی شکل شیب

شاخص خیزی توپوگرافیکی²: نشان دهنده کنترل توپوگرافی بر روی خیزی خاک می‌باشد (ویلسون، 2018).

$$TWI = \ln \left(\frac{A}{\tan \theta} \right)$$

شاخص خیزی

TWI: توپوگرافیکی

شاخص زبری³ (ویلسون، 2018):

$$TRI = \sqrt{(\sum_{i=1}^n Xi)^2 + (\sum_{i=1}^n Yi)^2 + (\sum_{i=1}^n Zi)^2} / n$$

TRI: اخس زبری

n : اندازه نمونه (تعداد سلول‌های پنجره متحرک) Xi, Yi, Zi از درصد شیب و جهت شیب محاسبه می‌شوند.

$$Xi = \sin(S) * \cos(A)$$

A: جهت شیب

S: شیب و

$$Yi = \sin(S) * \sin(A)$$

$$Zi = \cos(A)$$

تابش پخشیده⁴: مقدار تابش خورشیدی که به طور غیرمستقیم از ابرها و غیره به هر نقطه می‌رسد.

$$DR = (0.271 - 0.294\tau m)Roh$$

DR: تابش پخشیده، τ : ضریب انتشار محلی برای هر سلول شبکه، m : جرم نسبی هوا و Roh : مقدار نور اتفاقی خورشید در یک نقطه خارج از اتمسفر.

داده کاوی

مدل سازی

با استفاده از زیر برنامه رگرسیون منطقی چندکلاسه نرم‌افزار اس پی اس اس نسخه 21 مدل‌های احتمال هر یک از کلاس‌های خاک با کمک مقادیر ویژگی‌های اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع تهیه گردید، سپس نقشه نهایی رقومی هر کلاس بر مبنای مناسب‌ترین مدل احتمال در محیط محاسبه‌گر رستری⁵ نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی نسخه 10/4 به دست آمد.

1. Slope Shape Curvature

2. Topographic Wetness index

3. Terrain Roughness Index

4. Diffuse radiation

5. Raster Calculator

6. Producer's Accuracy

7. User's Accuracy

8. Overall Accuracy

1 می‌باشد که تبعاً مقادیر بالاتر نشان دهنده عملکرد مناسب مدل می‌باشد.

نتایج

تفسیر نتایج مدل‌سازی خاک‌ها

به طور کلی خاک‌های منطقه مورد مطالعه شامل سه رده مالی‌سولز، اینسپتی‌سولز و انتی‌سولز (جدول 1) و 6 کلاس در سطح رده‌بندی خانواده می‌باشند که به ترتیب مساحت و درصد هر یک از واحدهای خاک در جدول 2 ارائه شده‌است. طبق جدول 2 بیشترین و کمترین مساحت واحدهای خاک در منطقه، به ترتیب مربوط به فامیل Fine, Carbonatic, Thermic Typic Haploxerolls و Fine-loamy, Carbonatic, Thermic, Shallow Typic Xerorthents می‌باشد که بر اساس مساحت نهایی محاسبه شده در نقشه نهایی کلاس‌های خاک به ترتیب 58 و 1 درصد از مساحت کل خاک‌های پیش‌بینی شده در منطقه را به خود اختصاص داده‌اند.

رابطه (3)، (n) تعداد ردیف‌ها در ماتریس، (Xij) تعداد مشاهدات در ردیف i و ستون j (درایه‌های قطر اصلی)، Xoi و Xio مجموع حاشیه بترتیب ردیف r و ستون i N تعداد کل مشاهدات.

صحت تولیدکننده و کاربر

$$UA = \frac{a_{tt}}{\sum_{i=1}^N a_{ki}} \quad (4)$$

$$PA = \frac{\sum_{i=1}^N a_{ki}}{\sum_{i=1}^N a_{ik}} \quad (5)$$

در رابطه (4) تعداد پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده بر روی قطر اصلی و $\sum_{i=1}^N a_{ki}$ جمع تعداد پیکسل‌هایی است که در آن ستون به عنوان نمونه‌های آموزشی آن طبقه‌بندی شده‌اند. در رابطه (5) تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده بر روی قطر اصلی و $\sum_{i=1}^N a_{ki}$ نمایه جمع تعداد پیکسل‌هایی است که در آن ردیف به عنوان نمونه‌های آموزشی آن طبقه‌بندی شده‌اند. دامنه تغییرات صحت تولیدکننده و صحت کاربر حدواسط 0 و

جدول 1- رده‌بندی خاک‌ها بر اساس کلید رده‌بندی خاک آمریکایی (2014)

ردیف	Soil Order رده خاک	Family soil class فامیل خاک	Subgroup زیرگروه	شماره خاکرخ
1	Inceptisols	Fine, carbonatic, thermic	Typic Calcixerepts	23
2	Inceptisols	Fine, carbonatic, thermic	Typic Haploxerepts	36
3	Inceptisols	Fine-loamy over Fragmental, carbonatic, thermic	Typic Haploxerepts	39
4	Mollisols	Fine, carbonatic, thermic	Typic Haploxerolls	11
5	Inceptisols	Fine-Loamy, carbonatic, thermic	Typic Haploxerepts	10
6	Entisols	Fine Loamy, carbonatic, thermic, shallow	Typic Xerorthents	9

جدول 2- مساحت و درصد واحدهای کلاس خاک

درصد	مساحت (هکتار)	تعداد خاکرخ	واحدهای خاک
5	54/39	4	1
27	320/87	11	2
6	71/32	4	3
58	696/16	22	4
4	43/02	3	5
1	12/07	2	6

ارائه شده در جدول 3 و مشاهدات صحرائی به شرح زیر می‌باشد:

واحد خاک شماره 1، افق سطحی دارای شرایط رنگ و درصد کربن آلی برای افق مالیک بوده و تنها به دلیل نداشتن شرط ضخامت (کمتر از 18 سانتی‌متر)، بر اساس کلید رده‌بندی 2014 آمریکایی به عنوان افق اُکریک

تشریح واحدهای نقشه خاک

برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و رده‌بندی خاکرخ‌های شاهد در واحدهای نقشه خاک منطقه مورد مطالعه در جدول 3 و تصاویر خاکرخ‌های شاهد در شکل 3 ارائه شده است. تعریف واحدهای خاک بر اساس نتایج

اکسید آهن از مواد مادری) همراه با تشکیل ساختمان خاک می‌باشد.

واحد خاک شماره 3، بر اساس مشاهدات صحرایی خاک (شکل 3-ج) دارای افق سطحی با ضخامت 15 سانتی‌متر و کربن آلی آن کمتر از یک درصد به عنوان افق آکریک و افق‌های زیرسطحی بصورت افق کمبیک مشاهده گردید. بعد از افق کمبیک به دلیل تغییرات شدید در اندازه ذرات سنگ و سنگریزه با بیشتر از 90 درصد در عمق 45 سانتی‌متری انقطاع سنگی تشخیص داده شد. در مرز پایین این افق یک افق کمبیک دیگر مشاهده شد که بلافاصله پس از این افق نیز یک افق مواد مادری با بیش از 90 درصد سنگ و سنگریزه در عمق بیشتر از 140 سانتی‌متری مشاهده گردید. این تغییرات نشان‌دهنده این است که این خاک با توجه به اینکه در نزدیکی آبراهه‌ها و رودخانه اصلی منطقه قرار گرفته دارای توالی رسوبگذاری و تکامل خاک دستخوش تغییرات پیش‌رونده و پس‌رونده می‌باشد. این خاک نسبتاً عمیق و در زیر گروه تیپیک هاپلوژرپتر و به دلیل دارا بودن درصد رس 18 تا 35 در کلاس اندازه ذرات فاین لومی و از طرفی به دلیل دارا بودن کمتر از 10 درصد خاک نرم دارای کلاس اندازه ذرات فراگمتال و در نهایت با لحاظ نمودن شرایط ذکر شده در بخش کنترل اندازه ذرات دارای تضاد بافتی فاین لومی بر روی فراگمتال⁷ می‌باشد. کلاس مینرالوژی خاک نیز به مانند واحدهای خاک 1 و 2 در کلاس کربناتیک و درصد کربن آلی خاک نیز دارای روند کاهشی با افزایش عمق و کلاس بافتی خاک بر خلاف دو واحد خاک شماره 1 و 2 سبکتر شده و در کلاس لوم رسی شنی همراه با افزایش درصد شن می‌باشد.

واحد خاک شماره 4، افق سطحی آن به دلیل دارا بودن شرط رنگ، ضخامت و درصد کربن آلی بیشتر از 1 درصد و با دارا بودن شرایط کشت و کار طولانی مدت و وجود باغات متمرکز در تراس‌های رودخانه، فرآیند خاک‌سازی ملانیزیشن⁸ (تیره شدن) به وقوع پیوسته که منجر به تشکیل افق مالیک در خاک سطحی شده است. در افق‌های زیرسطحی نیز دارای سه افق ساختمانی همراه با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز کمبیک و بطور کلی از لحاظ عمق خیلی عمیق و با دارا بودن افق مالیک در رده مالی سولز قرار گرفته و در تفاوت با خاک واحدهای شماره 1، 2 و 3 که به دلیل نداشتن افق مالیک در رده اپنسپتی سولز بودند دارای تکامل بیشتر و از لحاظ پراکندگی مکانی بیشترین سطح را در منطقه به خود

شناسایی شد. افق‌های زیرسطحی در آن شامل کمبیک و کلسیک به‌طوریکه افق کلسیک آن در داخل 100 سانتی‌متری از سطح خاک معدنی قرار می‌گیرد. از طرفی به دلیل داشتن رژیم رطوبتی زیریک، گروه بزرگ رده‌بندی آن کلسی زرپتر می‌شود. به دلیل عدم سایر ویژگی مشخصه در زیرگروه تیپیک¹ و در سطح فامیل رده‌بندی خاک در بخش کنترل اندازه ذرات به دلیل دارا بودن درصد رس کمتر از 60 درصد در کلاس اندازه ذرات فاین² و با توجه به درصد آهک معادل بیشتر از 40 درصد در کلاس مینرالوژی کربناتیک³ قرار دارد. این خاک در اراضی با فیزیوگرافی تپه‌ها بیشتر مشاهده شد و از تکامل خوبی برخوردار بود. خاکی است خیلی عمیق که با افزایش عمق درصد سنگ و سنگریزه افزایش یافته و درصد کربن آلی آن نیز از روند کاهشی و واکنش خاک آن به دلیل افزایش درصد کربنات کلسیم در افق‌های زیرسطحی و شستشو از افق‌های بالایی دارای روند افزایشی است. فرایند خاک‌سازی غالب در این واحد خاک، کلسیفیکیشن⁴ می‌باشد.

واحد خاک شماره 2، دارای افق مشخصه سطحی آکریک که در مقایسه با خاک شماره 2 دارای ضخامت بیشتر و از طرفی درصد کربن آلی آن کاهش یافته و افق‌های زیرسطحی آن از نوع کمبیک با ساختمان بلوکی متوسط و از لحاظ عمق، خاکی خیلی عمیق با بیش از 120 سانتی‌متر ضخامت می‌باشد. با دارا بودن سه افق کمبیک در داخل 100 سانتی‌متری از سطح خاک معدنی و بر اساس کلید رده‌بندی 2014 آمریکایی و به دلیل نداشتن هرگونه ویژگی مشخصه در این عمق در زیر گروه تیپیک هاپلوژرپتر⁵ قرار می‌گیرد. در سطح خانواده مشابه با خاک واحد شماره 1 و با دارا بودن بیشتر از 35 درصد رس در بخش کنترل اندازه ذرات به کلاس فاین و بر اساس درصد آهک معادل بیشتر از 40 درصد به کلاس مینرالوژی کربناتیک تعلق می‌گیرد. از لحاظ کلاس بافتی مشابه با واحد خاک 1 با افزایش عمق، کلاس بافت خاک سنگین‌تر با درصد رس بیشتر و همچنین درصد سنگ و سنگریزه نیز دارای روند افزایشی و کربن آلی خاک نیز دارای روند کاهشی می‌باشد. این خاک به طور کلی در نواحی پای تپه‌ها مشاهده گردید و فرآیند خاک‌سازی غالب برونیفیکیشن⁶ (قهوه‌ای شدن در اثر آزاد شدن

1. Typic

2. Fine

3. Carbonatic

4. Calcification

5. Typic Haploxerepts

6. Brownification

7. Fragmental

8. Melanization

شیب میان‌ی و مقدار تابش پخشیده از میان 18 ویژگی اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع بر اساس تجزیه و تحلیل معادلات رگرسیون منطقی جهت برآورد کلاس‌های خاک انتخاب گردیدند.

معادله رگرسیونی فامیل خاک شماره 4

احتمال رخداد $\exp(17.0 - 3.44 Rsp + 2.08$

$Plan + 1.54 Prof + 0.579 TWI + 0.214 Tr - 29.4 Diff_insol) / 1 + \exp(17.0 - 3.44 Rsp + 2.08 Plan + 1.54 Prof + 0.579 TWI + 0.214 Tr - 29.4 Diff_insol I)$

نتایج پیش‌بینی احتمال واحدهای خاک

حداکثر احتمال حضور برای کلاس‌های فامیل 1 تا 6 به ترتیب 0/10، 0/32، 0/86، 0/27، 0/47 و 0/35 به دست آمد. نتایج اعتبارسنجی مدل‌سازی خاک‌های منطقه بر اساس آماره صحت کلی برابر 0/60 حاصل گردید که این نتیجه بیانگر پیش‌بینی نسبتاً خوب از پیش‌بینی مکانی کلاس‌های خاک ارائه نموده‌است که انتخاب صحیح متغیرهای محیطی می‌تواند یکی از مهمترین عوامل توجه‌کننده این میزان صحت در اعتبارسنجی مدل باشد. شاخص کاپای به دست آمده از مدل برای کلاس‌های فامیل‌های خاک برابر با 0/38 حاصل گردید که مبین توافق نسبتاً کم پیش‌بینی احتمال کلاس‌های خاک در کل منطقه مورد مطالعه با خاک‌های مشاهده‌ای می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند تعداد کم خاک‌های مشاهده‌ای و همچنین دخیل نبودن سایر متغیرهای محیطی باشد که نماینده سایر فاکتورهای خاک‌سازی در تبیین ارتباط خاک - زمین‌نما باشند (تومانیان و همکاران، 2007). در شکل‌های 4 و 5 به ترتیب بهترین پیش‌بینی نقشه که مربوط به کلاس خاک 4 و هم‌چنین نقشه نهایی کلاس‌های خاک منطقه در سطح فامیل ارائه شده است. نقشه احتمال کلاس فامیل خاک شماره 4 در شکل 4 با حداکثر احتمال حضور این کلاس را 0/86 نشان داده شده‌است. با توجه به نقشه کلاس‌های خاک منطقه می‌توان بیان نمود که بهترین پیش‌بینی مربوط به کلاس خاک شماره چهار می‌باشد که فراوانی بیشتر، بالا بودن دامنه تغییرپذیری پارامترهای محیطی برای این کلاس، از دلایل پیش‌بینی موفق مدل رگرسیون منطقی چند جمله‌ای بوده است. همچنین در رابطه با سایر کلاس‌های فامیل خاک فراوانی کم مشاهدات خاک‌رخی و نیز کاهش فراوانی فامیل‌های خاکی در کلاس‌های موجود در نقشه باعث کاهش دقت مدل در پیش‌بینی آن‌ها می‌باشد.

اختصاص داده است. این خاک در زیرگروه تیپیک هاپلوزرولز و در سطح خانواده به دلیل دارا بودن درصد رس بیشتر از 35 درصد و کمتر از 60 درصد در کلاس اندازه ذرات فاین و کلاس مینرالوژی آن نیز به دلیل دارا بودن درصد کربنات کلسیم بیشتر از 40 درصد مشابه با خاک‌های واحدهای ذکرشده قبلی در کلاس کربناتیک قرار می‌گیرد.

واحد خاک شماره 5، دارای افق سطحی اکریک با ضخامت 20 سانتی‌متر و یک افق زیرسطحی کمبیک با ساختمان بلوکی زاویه‌دار متوسط که بر روی افق انتقالی CB با 70 درصد قطعات سنگی می‌باشد. بر اساس کلید رده‌بندی آمریکایی 2014 در رده اینسپتی‌سولز و به دلیل نداشتن سایر ویژگی‌های مشخصه در زیرگروه تیپیک هاپلوزرپتر و در سطح خانواده به دلیل دارا بودن درصد رس 18 تا 35 درصد و درصد حجمی سنگ و سنگریزه بیشتر از 15 درصد در کلاس فاین لومی قرار می‌گیرد. به دلیل دارا بودن درصد آهک معادل بیشتر از 40 درصد در کلاس کربناتیک و تنها تفاوت آن با واحد خاک 2 در درصد اندازه ذرات رس در بخش کنترل ذرات می‌باشد. این خاک دارای بافت سطحی لومی و در افق زیرسطحی کمبیک اول دارای بافت سنگین‌تر لوم رسی و در افق کمبیک دوم به مانند افق سطحی دارای بافت لومی می‌باشد. درصد سنگ و سنگریزه آن در افق‌های زیرسطحی در مقایسه با واحد خاک شماره 2 بیشتر از 20 درصد می‌باشد.

واحد خاک شماره 6، در مقایسه با واحد‌های ذکر شده قبلی بدون تکامل و یا با تکامل محدود در تشکیل افق سطحی اکریک و عدم مشاهده هر گونه افق مشخصه زیرسطحی در رده انتی‌سولز و در نهایت در زیرگروه تیپیک زراورتنز قرار می‌گیرد. به دلیل دارا بودن لایه محدودکننده شبه‌سنگی هوادیده از جنس مارن آهکی در عمق کمتر از 36 سانتی‌متر (شکل 3-خ) و تا بالای این لایه دارای 18 تا 35 درصد رس، کلاس اندازه ذرات آن فاین لومی می‌شود. کلاس مینرالوژی آن با دارا بودن بیشتر از 40 درصد آهک معادل، کربناتیک شده و به کلاس کم عمق خاک¹ به دلیل وجود لایه شبه‌سنگی در عمق کمتر از 50 سانتی‌متر تعلق می‌گیرد.

نتایج تجزیه و تحلیل لایه‌های محیطی

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول 4، پنج ویژگی خمیدگی طولی، خمیدگی عمودی، شاخص رطوبت وابسته به پستی و بلندی، شاخص زبری زمین، موقعیت

¹ shallow

جدول 3- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و رده‌بندی خاک‌های شاهد واحدهای نقشه خاک

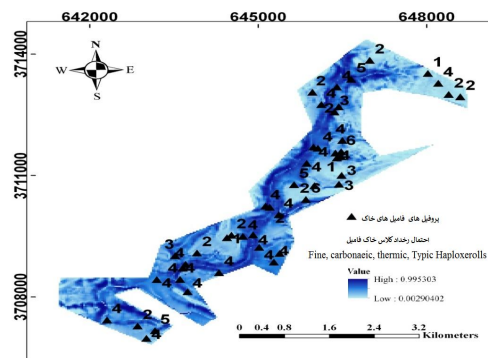
ظرفیت تبادل کاتیونی (Cmol+/kg)	رنگ خاک		هدایت الکتریکی (ds/m)	واکنش خاک pH	بافت خاک	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	سنگ و سنگریزه درصد	شن	سیلت	رس	عمق (cm)	افق
	مرطوب	خشک											
واحد خاک 1، خاک‌رخ شاهد شماره 23 Calcixerepts، Fine, carbonatic, thermic, Typic													
17/18	7/5YR3/3	7/5YR5/3	0/194	7/11	SCL	1/482	61/75	-	49/18	26/66	24/16	0-15	Ap
19/82	7/5YR3/4	7/5YR5/3	0/113	7/57	SC	0/312	66/75	5	45/84	16/66	37/5	15-45	Bw
19/35	7/5YR4/3	7/5YR5/3	0/110	7/58	SC	0/175	68	40	49/16	13/34	37/5	45-100	Bk ₁
19/33	7/5YR4/3	7/5YR5/3	0/106	7/60	SC	0/170	67/5	40	49/2	13/3	37/5	100-150	Bk ₂
واحد خاک 2، خاک‌رخ شاهد شماره 36 Haploxerepts، Fine, carbonatic, thermic, Typic													
13/5	2/5Y5/4	2/5Y7/3	0/141	7/11	SCL	0/409	66	10	49/16	26/66	24/18	0-20	Ap
14/15	10YR6/4	10YR7/3	0/083	7/57	SC	0/117	68	30	48	16/66	35/34	20-45	Bw1
13/81	10YR6/4	10YR8/2	0/071	7/63	SC	0/019	68	45	47/0	16/26	36/74	45-75	Bw2
14	10YR6/4	10YR8/2	0/070	7/66	SC	0	68/25	25	45/8	17	37/2	75-140	Bw3
واحد خاک 3، خاک‌رخ شاهد شماره 39 Haploxerepts، Fine-loamy over Fragmental, carbonatic, thermic, Typic													
16/16	2/5Y4/2	2/5Y6/2	0/155	7/22	SCL	0/944	62/5	10	50/84	23/33	25/83	0-15	Ap
17/54	2/5Y4/2	2/5Y6/2	0/117	7/52	SCL	0/858	62/75	30	54/16	16/66	29/18	15-45	Bw
13/17	2/5Y4/2	2/5Y6/2	0/107	7/59	SCL	0/078	64/25	90	58/34	15/83	25/83	45-90	C
11/25	2/5Y4/2	2/5Y6/2	0/104	7/79	SCL	0	57/25	5	58/34	19/16	22/5	90-140	2Bw
-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	-	-	+140	2C
واحد خاک 4، خاک‌رخ شاهد شماره 11 Haploxerolls، Fine, carbonatic, thermic, Typic													
19/15	10Y4/3	10Y6/3	0/155	7/12	CL	1/326	65/5	10	45	25/84	29/16	0-25	Ap
20/67	10Y4/3	10YR7/3	0/123	7/39	CL	0/799	65/25	5	42/5	22/5	35	25-50	Bw1
19/73	10Y4/3	10YR6/3	0/111	7/43	CL	0/526	63/5	40	42/16	22	35/84	50-90	Bw2
17/92	10YR5/4	10YR7/3	0/105	7/5	CL	0	66/25	5	45	19	36	90-140	Bw3
واحد خاک 5، خاک‌رخ شاهد شماره 10 Haploxerepts، Fine-loamy, carbonatic, thermic, Typic													
-	10YR7/3	10YR5/4	0/149	7/4	L	0/95	60/44	20	23/6	49/4	27	0-20	Ap
-	10YR7/3	10YR5/4	0/134	7/59	CL	0/58	60/44	50	23/6	46/4	30	20-50	Bw2
-	2/8YR10	4/7YR10	126/0	7/7	L	33/0	60/96	70	29/6	46/4	24	50-150	BC
واحد خاک 6، خاک‌رخ شاهد شماره 9 Xerorthents، Fine loamy, carbonatic, thermic, shallow													
15/76	10YR4/4	10YR7/3	0/144	7/30	SL	1/794	68/5	10	64/18	16/66	19/16	0-15	Ap
13/77	10YR6/4	10YR8/2	0/086	7/63	SCL	0/370	68/5	20	58/34	16/66	25	15-32	B/C
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+32	Cr



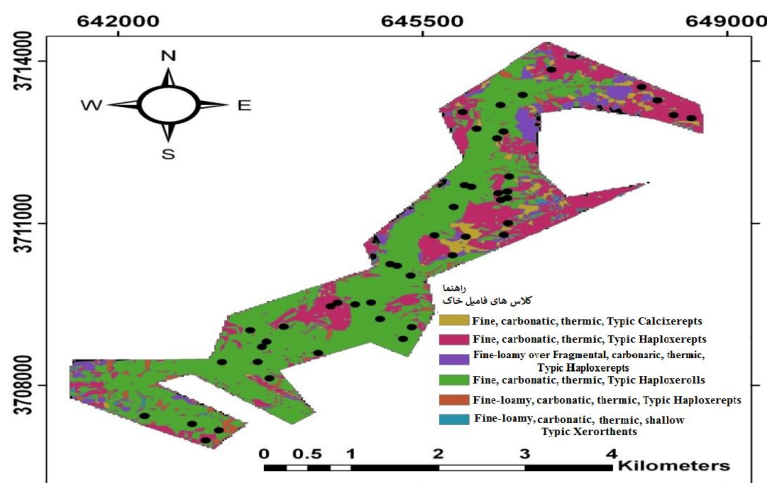
شکل 3- خاکرخ‌های شاهد الف- واحد 1، ب- واحد 2، ج- واحد 3، د- واحد 4، ح- واحد 5، خ- واحد 6

جدول 4- متغیرهای محیطی مهم برای پیش‌بینی مکانی کلاس‌های خاک با رگرسیون منطقی چند جمله‌ای

متغیر	توصیف	منبع
پارامترهای محیطی	Profile curvature	خمیدگی سطح در تندترین شیب (Taghizadeh-mehrjardi <i>et al.</i> , 2015)
	Plane curvature	خمیدگی در یک سطح افقی (Taghizadeh-mehrjardi <i>et al.</i> , 2015)
	Topographic Wetness Index	شاخص رطوبت پستی و بلندی (Böhner <i>et al.</i> , 2001)
	Terrain Ruggedness Index	شاخص زبری زمین (Böhner <i>et al.</i> , 2001)
	Mid-Slope position	میزان شباهت هر پیکسل در موقعیت تیغه یا دره بین 0 تا 100 (Dietrich and Bohner, 2008)
	Diffusion inclusion	مقدار تابش خورشیدی که به طور غیرمستقیم (از ابرها و غیره) به هر نقطه می‌رسد (Böhner <i>et al.</i> , 2002)



شکل 4- نقشه احتمال فامیل خاک شماره 4 همراه با موقعیت سایر کلاس‌های خاک



شکل 5- نقشه پیش‌بینی کلاس‌های خاک منطقه در سطح فامیل

صحت کاربر و صحت تولید کننده برای کلاس خاک شماره 4 به ترتیب برابر با 0/90 و 0/74 به دست

جدول 5 نتایج ارزیابی صحت کاربر و صحت تولیدکننده را برای کلاس‌های فامیل خاک نشان می‌دهد. همانطور که در جدول 5 نشان داده شده بالاترین مقدار

آمد. نتایج ارائه شده در جدول 5 نشان می‌دهد که خاک شماره 4 دارای بالاترین مقدار صحت تولیدکننده و کاربر می‌باشد که نشان دهنده عملکرد خوب مدل رگرسیون منطقی برای پیش‌بینی این کلاس خاکی نسبت به سایر کلاس‌ها می‌باشد. کمترین مقدار صحت برای کلاس خاک شماره 6 با صحت تولیدکننده و کاربر صفر می‌باشد.

تعداد خاک‌رخی‌های فامیل 6 در منطقه حداقل رخداده (2) مورد) می‌باشد و از آنجایی که مدل رگرسیون منطقی از روش‌های بر پایه رگرسیون می‌باشد دقت پیش‌بینی آن به تعداد تکرارهای فامیل خاک وابسته است و این نتیجه در مطالعات قبلی پژوهشگران و این مطالعه مشاهده گردید.

جدول 5- فراوانی، صحت تولید کننده (PA)، صحت کاربر (UA) برای کلاس‌های خاک در سطح فامیل

کلاس خاک	PA%	UA%
1	0/	0/
2	0/54	0/46
3	0/25	0/33
4	0/90	0/74
5	0/33	0/50
6	0/0	0/0

*Producer accuracy * Users accuracy

بحث

یک نقشه خوب دارای مقادیر خلوص نقشه، دقت کاربر و قابلیت اطمینان تولیدکننده‌ی نزدیک به یک است (بهرنس و همکاران، 2010)، که در این مطالعه نیز دقت کلی، دقت کاربر و قابلیت اطمینان تولیدکننده برای برخی کلاس‌های خاک مقداری قابل قبول حاصل گردید. افشار و همکاران (2018)، در مطالعه نقشه‌برداری رقومی خاک با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون منطقی چندجمله‌ای، صحت کلی نقشه را 0/60 گزارش کردند. دقت کلی نقشه‌های خاک نسبتاً خوب بوده که این نشان دهنده‌ی انتخاب صحیح متغیرها و مدل‌ها در تهیه نقشه پیش‌بینی فامیل خاک است. نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج جعفری و همکاران (1390) در کاربرد مدل رگرسیونی در پیش‌بینی کلاس‌های خاک در بخشی از مناطق مرکزی ایران منطقه زرنند کرمان با دقت کلی 0/60 هم‌خوانی دارد. جیون و همکاران (2018)، شاخص کاپا را در مدل رگرسیون منطقی چندجمله‌ای برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک 0/45 گزارش نمودند و توجیه کاهش این مقدار را در انتخاب لایه‌های محیطی مناسب و موقعیت منطقه گزارش کردند. در مطالعه حاضر نیز موقعیت مکانی منطقه، وضعیت توپوگرافیک نقاط و نیز انتخاب لایه‌های محیطی ممکن است دلیلی بر کاهش مقدار شاخص کاپا باشد. جیون و همکاران (2018)، بالاترین مقدار صحت کاربر و صحت تولیدکننده را 0/79 و 0/69 و کمترین مقدار را برای برخی از کلاس‌های خاک حداقل یا نزدیک به صفر گزارش نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نیز

برای بهترین پیش‌بینی کلاس خاک دارای بالاترین مقدار صحت کاربر تولیدکننده بوده که با نتایج مطالعه جیون و همکاران (2018) هم‌خوانی دارد. مطالعات متعددی بر اساس تکنیک‌های مختلف نقشه-برداری رقومی خاک صورت پذیرفته است که می‌توان به (دبلاگیلو و اتزلمر، 2009، جیاسون و همکاران، 2011، لمرسیور و همکاران، 2011 و کاتن و همکاران، 2011) که مهم‌ترین عامل بالا بردن دقت مدل‌سازی را همبستگی و ارتباط خوب بین متغیرهای محیطی و هدف برشمردند و نیز کلاس‌های خاکی که با متغیرهای کمکی همبستگی بیشتری داشتند، بهتر پیش‌بینی شده‌اند. جعفری و همکاران (2013) و وایسی و لاگاجری (2015)، تأثیر معنی‌دار ویژگی‌های توپوگرافی را در پیش‌بینی کلاس‌های خاک با استفاده از روش رگرسیون منطقی چند جمله‌ای نشان داده و بیان نمودند که ویژگی‌های توپوگرافی و فرایندهای ژئومورفیک در پیش‌بینی کلاس‌های خاک نشان داده است که این فاکتورها از خصوصیات مؤثر بر تشکیل خاک منطقه مورد مطالعه هستند. جعفری و همکاران (2012)، تعداد نمونه‌ها، سطح منطقه مورد مطالعه و مقیاس نقشه را از جمله پارامترهای می‌دانند که نتایج و عملکرد پیش‌بینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند که این خود می‌تواند دلیلی باشد بر این امر که پیش‌بینی خاک‌های با حضور خیلی محدود دقت کمتری دارند و در حالیکه پیش‌بینی خاک‌هایی با حضور فراوان‌تر دقت بیشتری دارند. جعفری و همکاران (1390) و پهلوان‌راد و همکاران (1393)، نیز گزارش نمودند که کلاس‌های خاکی که از نظر فراوانی

پیش‌بینی شش کلاس فامیل خاک گردید. بیشترین صحت پیش‌بینی مربوط به کلاس خاک شماره 4 با میزان 0/86 می‌باشد، یکی از دلایل این نتایج، فراوانی بیشتر کلاس‌های فامیل در واحد خاک ذکر شده و نیز زیاد بودن دامنه‌ی تغییرات پارامترهای محیطی برای این واحد خاک می‌باشد. در واحد خاک 6 با توجه به تعداد کم مشاهدات خاکرخی، کمترین میزان پیش‌بینی را با دقتی برابر با 0/10 داشتیم. دقت کلی و نیز ضریب کاپای مدل برای کلاس‌های فامیل به ترتیب 0/60 و 0/38 بود. دقت کلی در نقشه‌های پیش‌بینی کلاس فامیل بالا بود زیرا در مورد کلاس‌های فامیل تنها گروه‌هایی انتخاب شدند که احتمال بالاتری را نشان می‌دادند. به طور کلی انتخاب صحیح متغیرها می‌تواند نقش مؤثرتری در نتیجه مدل ایفا کند. در ضمن بر اساس نتایج این مطالعه، برای ارتقاء دقت و صحت پیش‌بینی مکانی کلاس‌های خاک مخصوصاً در مورد واحدهایی که دارای دقت پایین‌تری می‌باشند افزایش تعداد مشاهدات میدانی و استفاده از متغیرهای محیطی از قبیل تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان مورد استفاده قرار داد. به طور کلی تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی می‌توانند فرآیند نقشه‌برداری خاک‌ها را در گستره‌ای وسیع و متشکل از هر گونه عوارض طبیعی به یک‌باره انجام دهند و سرعت عمل و کارآمدی نقشه‌ها را در انتقال داده‌ها و اطلاعات افزایش داده و قابلیت استفاده از آنها را برای بخش وسیعی از کاربران اراضی مقدور سازد.

نمونه‌ی کمتری داشته‌اند، دارای خطای پیش‌بینی بیشتری بودند. نتایج حاصل از این مطالعه نیز نشان داد که تعداد مشاهدات کم، انتخاب متغیرهای کمکی مناسب، مساحت منطقه مورد مطالعه بر دقت کلی نقشه و پیش‌بینی مکانی مناسب برای هر کلاس خاکی اثرگذار است و در نهایت با پژوهش‌های انجام شده هم‌خوانی دارد. آکسوی و همکاران (2009)، گزارش کردند ترکیب اجزای سرزمین و داده‌های سنجش از دور، ابزار قدرتمندی در نقشه‌برداری خاک است. ویژگی‌های مختلف مدل رقومی ارتفاع دارای رابطه نزدیکی با ویژگی‌های محیطی و خاک هستند که استفاده از این ویژگی‌ها در شناسایی خاک علاوه بر اینکه بر دقت کار می‌افزاید، از صرف هزینه و زمان نیز می‌تواند بکاهد.

نتیجه‌گیری کلی

مشتملات مدل رقومی ارتفاع، ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های محیطی و خاک دارند. استفاده از این ویژگی‌ها در شناسایی خاک می‌تواند تا حد زیادی بر دقت تهیه نقشه خاک بیفزاید و از صرف هزینه و زمان بکاهد. در این پژوهش، مهم‌ترین ویژگی‌های مدل رقومی ارتفاع، که در پراکنش خاک‌ها تأثیر بیشتری داشتند عبارتند از موقعیت میانی شیب، شاخص زبری زمین، شاخص رطوبت پستی بلندی زمین، تابش خورشیدی پراکنده، موقعیت شیب نسبی، مقدار تغییرات جهت در یک خط تراز و مقدار تغییرات شیب در جهت بیشترین شیب خطی. مدل‌سازی رگرسیون منطقی چند متغیره موفق به

فهرست منابع:

1. افشار، ف، ایوبی، ش، جعفری، ا. (1395). نقشه‌برداری رقومی کلاس‌های خاک با استفاده از نقشه خاک قدیمی در منطقه خشک جنوب شرق ایران. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). 21 (1): 239-253.
2. بنایی، م. (1377). نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور ایران.
3. پهلوان‌زاد، م. خرمالی، ف. تومانیان، ن. کیانی، ف. کمکی، ب. (1393). پهنه‌بندی رقومی واحدهای خاک با استفاده از مدل درختان تصمیم‌گیری تصادفی در استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 21 (6): 73-93.
4. تقی‌زاده مهرجردی، ر، سرمیدان، ف، امید، م، تومانیان، ن، روستا، م، رحیمیان، م. (1393). نقشه‌برداری رقومی کلاس‌های خاک با استفاده از انواع روش‌های داده‌کاوی در منطقه اردکان یزد. مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی). 37 (2): 115-101.
5. جعفری، ا، ایوبی، ش، خادمی، ح. (1390). کاربرد مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی کلاس خاک در بخشی از مناطق ایران مرکزی (مطالعه موردی منطقه زرنند کرمان). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 25 شماره 6. 1364-1353.

6. فاتحی، ش.، محمدی، ج.، صالحی، م.، مومنی، ع.، تومانیان، ت.، جعفری، ا. (1394). انبوهش‌زدائی مکانی نقشه‌ی سنتی خاک با استفاده از رگرسیون لاجیستیک چند کلاسه و درختان طبقه‌بندی (مطالعه موردی: زیر حوضه آبخیز مرک در استان کرمانشاه). چهاردهمین کنگره علوم خاک.
7. Afshar, F. A., Ayoubi, S., & Jafari, A. (2018). The extrapolation of soil great groups using multinomial logistic regression at regional scale in arid regions of Iran. *Geoderma*, 315, 36-48.
 8. Behrens, T., Zhu, A. X., Schmidt, K., & Scholten, T. (2010). Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155(3-4), 175-185.
 9. Böhner, J., Koethe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A., & Selige, T. (2001). Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation. *Soil classification*, 2003.
 10. Brus, D. J., Kempen, B., & Heuvelink, G. B. M. (2011). Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, 62(3), 394-407.
 11. Caten, A. T., Dalmolin, R. S. D., PEDRON, F. D. A., & MENDONÇA-SANTOS, M. D. L. (2011). Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. *Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
 12. Debella-Gilo, M. (2007). The Application of Digital Terrain Analysis for Digital Soil Mapping: Examples from Vestfold County, South-Eastern Norway (Master's thesis).
 13. Debella-Gilo, M., & Etzelmüller, B. (2009). Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *Catena*, 77(1), 8-18.
 14. Dietrich, H., & Böhner, J. (2008). Cold air production and flow in a low mountain range landscape in Hessia (Germany). *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 19, 37-48.
 15. Giasson, E., Figueiredo, S. R., Tornquist, C. G., & Clarke, R. T. (2008). Digital soil mapping using logistic regression on terrain parameters for several ecological regions in Southern Brazil. In *Digital soil mapping with limited data* (pp. 225-232). Springer, Dordrecht.
 16. Guo, zh., Adhikari, A., Chellasamy, M., Grevec, M. B., Owens, R., Greve, M. (2019), Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction. *Geoderma*, 340:303-312.
 17. Jafari, A., Ayoubi, S., Khademi, H., Finke, P. A., & Toomanian, N. (2013). Selection of a taxonomic level for soil mapping using diversity and map purity indices: a case study from an Iranian arid region. *Geomorphology*, 201, 86-97.
 18. Jafari, A., Finke, P. A., Vande Wauw, J., Ayoubi, S., & Khademi, H. (2012). Spatial prediction of USDA-great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science*, 63(2), 284-298.
 19. Jeune, W., Francelino, M. R., de Souza, E., & Inácio, E. (2018). Multinomial Logistic Regression and Random Forest Classifiers in Digital Mapping of Soil Classes in Western Haiti. *Rev Bras Cienc Solo*, 42, e0170133.
 20. McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1), 3-52.
 21. Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69(3), 331-343.
 22. Pahlavan-Rad, M. R., Khormali, F., Toomanian, N., Brungard, C., Kiani, F., Komaki, CH, Bogaert, P. (2016). Legacy soil maps as a covariate in digital soil mapping: A case study from Northern Iran. *Geoderma*, 279, 141-148.

23. Roozitalab, M. H., Siadat, H., & Farshad, A. (Eds.). (2018). The Soils of Iran. *Springer International Publishing*.
24. Schaetzl, R. J., & Anderson, S. (2005). Soils: Genesis and geomorphology. Cambridge Univ. Press, New York. *Soils: Genesis and geomorphology*. Cambridge Univ. Press, New York.
25. Schoeneberger, P. J. (2012). Field book for describing and sampling soils. Government Printing Office.
26. Soil Survey Staff, (2014). Keys to soil taxonomy. 12th edn. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
27. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Minasny, B., & Triantafilis, J. (2015). Comparing data mining classifiers to predict spatial distribution of USDA-family soil groups in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 253, 67-77.
28. Vaysse, K., & Lagacherie, P. (2015). Evaluating digital soil mapping approaches for mapping Global Soil Map soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional*, 4, 20-30.
29. Wilson, J.(2018). Environmental applications of digital terrain modeling. *John Wiley & Sons*. 359pp.

Spatial Prediction of Soil Units Using Geographic Information Systems in Sivan Lands of Ilam Province

Z. Maghsodi, M. Rostaminia¹, M. Faramarzi, A. Keshavarzi,
and A. Rahmani

MSc Student, Water and Soil Engineering Group, Faculty of Agricultural, Ilam University;
E-mail: s_maqsodi@yahoo.com

Assistant Professor, Water and Soil Engineering Group, College of Agriculture, Ilam University;
E-mail: m.rostaminya@gmail.ac.ir

Associate Professor, Rangeland and Watershed Group, College of Agriculture, Ilam University;
E-mail: m.faramarzi@ilam.ac.ir

Assistant Professor, Soil Science and Engineering Department, College of Agriculture, Tehran
University; E-mail: alikeshavarzi@ut.ac.ir

PhD Student, Soil Science and Engineering, Tehran University; E-mail: a.rahmani@ut.ac.ir

Received: November, 2018 and Accepted: March, 2019

Abstract

Limitations in conventional soil identification methods and the advances made in information technology in soil science have attracted more attention to new approaches to soil mapping in order to improve the purity of soil maps. The present study was carried out in a part of Ilam province to identify and prepare soil maps of this region. At first, 46 profiles were identified. Then, based on the morphological characteristics of each profile, soil samples were taken from all genetic horizons and analyzed for chemical and physical properties. Then, the soils were classified based on the Soil Survey Staff keys (2014). A multinomial logistic regression model was used for spatial prediction of soil taxonomic classes. The geomorphometric features were extracted from digital elevation model with a resolution of 30 m² by SAGAGIS2.2 software. The classification results of each soil control profile in the studied area showed that, in general, the soils were in three order categories: Mollisols, Inceptisols, Entisols, and six classes at the family level. The correlation between the features of digital elevation model showed that the parameters of the mid slope position, spatial solar radiation, index of moisture content, ground roughness index, surface curvature, and profile curvature had the most effect on the formation of soil family classes. The overall accuracy and Kappa index of spatial prediction map from the regression model was 60% and 0.38 at the familial level, respectively. Finally, the results of this study showed that geomorphometric variables had a significant influence on the prediction of soil classes. Therefore, it is suggested that in future studies, other covariates derived from remote sensing data should also be used to improve the quality and accuracy of soil maps.

Keywords: Digital Soil Mapping, Multinomial logistic regression method, Data mining, Covariate

¹ Corresponding author: Water and Soil Science Department, Faculty of Agricultural, Ilam University