

نقشه برداری رقومی سه بعدی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در منطقه دورود استان لرستان

روح اله تقی زاده مهرجردی^{۱*} - علیرضا امیریان چکان^۲ - فریدون سردمیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۰

چکیده

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از جمله خصوصیات مهم خاک می باشد که در پایگاه های داده های مربوط به خاک و به عنوان ورودی در مدل های زیست محیطی و نیز مدل های مربوط به خاک به کار می رود. این مقاله از یک روش جدید برای پیش بینی تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به طور پیوسته (تا عمق یک متر) در منطقه دورود استان لرستان بهره می گیرد. در مطالعه حاضر از ترکیب معادلات عمق اسپیلاین با نواحی یکسان و تکنیک نقشه برداری رقومی خاک بهره گرفته شد تا با استفاده از تعداد محدودی نقطه (۱۰۳ نقطه)، تغییرات سطحی و عمقی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در کل محدوده مورد مطالعه بررسی شود. جهت ارتباط دادن ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و متغیرهای کمکی به دست آمده از تصاویر ماهواره ای و مدل رقومی ارتفاع، از مدل رگرسیون درختی استفاده شد. نتایج نشان داد که در پیش بینی پارامتر مذکور، بعضی از پارامترهای کمکی از جمله باند سه تصویر ماهواره و مساحت اصلاح شده حوزه دارای اهمیت بیشتری بودند. همچنین نتایج نشان داد که مدل درختی به خوبی متغیر هدف را در پنج عمق استاندارد با ضریب تبیین ۰/۸۴، ۰/۸۴، ۰/۸۴، ۰/۶۶، ۰/۲۷ و میانگین ریشه مربعات به ترتیب ۱/۷۵، ۱/۸۴، ۱/۸۴، ۲/۱۱، ۲/۱۶ پیش بینی کرده است که بیانگر قابل قبول بودن نتایج در همه اعماق (بجز عمق پنجم) می باشد. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که استفاده از نقشه برداری رقومی، رگرسیون درختی و معادله اسپیلاین با نواحی یکسان ابزارهایی قدرتمند جهت برآورد تغییرات مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به صورت جانبی و عمقی می باشند.

واژه های کلیدی: رگرسیون درختی، معادلات عمق خاک، نقشه برداری رقومی خاک

مقدمه

ارائه دهند کم است (۱۳). در پاسخ به مشکلات سیستم نقشه برداری قدیم به تدریج روش های کمی توسعه یافته است. روش های کمی قادر به بیان توزیع جغرافیایی خاک ها به شکل بهتر و دقیق تر می باشند. این روش ها تحت عنوان پدومتری در خاکشناسی معرفی شده اند (۳۱). در حقیقت نقشه برداری با روش های پدومتری، نقشه برداری رقومی نیز نامیده می شود (۲۰). نقشه برداری رقومی خاک در واقع توسعه یک مدل عددی یا آماری از رابطه بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک است که برای داده های جغرافیایی زیادی به منظور تولید نقشه رقومی به کار می رود (۲۲). سه هدف اصلی نقشه برداری رقومی عبارت از: ۱) استنباط رابطه بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک، ۲) تولید و ارائه داده هایی که پیوستگی خاک-زمین نما را بهتر نمایش می دهند و ۳) بکارگیری صریح دانش کارشناس در طراحی مدل می باشد. همچنین نقشه برداری رقومی با ایجاد بینشی در مورد فرآیندهای خاک سازی، باعث پیشرفت بالقوه پدولوژی و جغرافیای خاک می شود (۳۴). پایه و اساس نقشه برداری رقومی خاک مبتنی بر معادله اسکورپن^۵ (۲۰) می باشد. در این معادله

از نظر مفهومی روش مرسوم خاکشناسی بر مدل منقطع یا مدل سطحی-کلاسی^۴ خاک ها استوار می باشد که اساس و زیربنای مدل پلی گونی تغییرات متغیرهای طبیعت است (۴۰). نمایش توزیع جغرافیایی خاک ها که بر مبنای تفکیک واحدهای نقشه بر روی عکس های هوایی و یا نقشه های توپوگرافی به همراه کنترل زمینی است، عاری از خطا نیست، زیرا خطا در مشاهده و ترسیم واحدها به علت این که متکی بر قابلیت های فردی و تجربی است اجتناب ناپذیر می باشد (۸). از دیگر مشکلات روش معمول نقشه برداری خاک ها، وابستگی تعیین حدود و مرز واحدهای خاک به قدرت درک و فهم کارشناس از روابط خاک و محیط است به نحوی که می توان گفت احتمال این که چند کارشناس مرز واحدی را از خاک های یک ناحیه

۱- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

*- نویسنده مسئول: (Email: Rh_taghizade@yahoo.com)

۲- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم النبیه بهبهان

۳- استاد گروه خاکشناسی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

نواحی یکسان^۴ (۲۹) بسیار مناسب و انعطاف پذیر می باشند. اساساً یک تابع اسپیلاین از مجموعه‌ای از توابع محلی درجه دوم که به شکلی به همدیگر گره^۵ شده‌اند تشکیل شده است. بیشاپ و همکاران (۴) کارایی بالای این تابع عمق را نسبت به سایر توابع عمق تایید کرده‌اند. ایشان از توابع اسپیلاین برای پیش‌بینی یکسری از خصوصیات خاک از قبیل واکنش خاک، قابلیت هدایت الکتریکی، درصد رس، ماده آلی خاک و میزان رطوبت حجمی خاک استفاده کردند. پر واضح است که توابع عمق خاک (اسپیلاین با نواحی یکسان) پیش‌بینی خصوصیات خاک را در یک نقطه به خوبی انجام می‌دهد. اما با رویکرد مکانی، مجموعه‌ای از این توابع باعث ایجاد یکسری نقاط فردی در منطقه می‌گردد. اما برای استفاده کنندگان خاک شاید این‌گونه اطلاعات زیاد مفید نباشد و آن‌ها احتیاج به اطلاعات خاک به صورت مکانی و پیوسته دارند. برای پاسخ به این درخواست، می‌توان به نقشه برداری رقومی خاک مراجعه کرد (۲۰).

با توجه به قابلیت‌های توابع عمقی خاک (۱۸) و نقشه برداری رقومی خاک (۱۶) به نظر می‌رسد که تنها راه برای پیش‌بینی سطحی و عمقی خصوصیات خاک، استفاده همزمان از این روش‌ها می‌باشد. همانطور که ملانو و همکاران (۱۸) با کاربرد همزمان اسپیلاین با نواحی یکسان و نقشه برداری رقومی خاک اقدام به پهنه بندی ماده آلی خاک و ظرفیت نگه‌داری رطوبتی خاک در استرالیا نمودند. ادگرز و همکاران (۲۷) در آمریکا، سلیمان و همکاران (۳۶) در اندونزی و تقی‌زاده و همکاران (۳۷) در ایران از توابع عمقی خاک و تکنیک‌های نقشه برداری رقومی جهت بررسی تغییرات تدریجی عمقی و سطحی متغیرهای خاک استفاده کردند. این تحقیق نیز تلاش دارد تا با استفاده از تکنیک نقشه برداری رقومی خاک (مدل رگرسیون درختی) و معادله عمق خاک (اسپیلاین با نواحی یکسان) به بررسی تغییرات مکانی سه بعدی (افقی و عمودی) ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در منطقه دورود استان لرستان بپردازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد تحقیق به وسعت تقریبی ۳۶۰۰ هکتار بخشی از دشت سیلاخور واقع در شمال غربی شهرستان دورود استان لرستان می‌باشد (شکل ۱). منطقه بر اساس سیستم UTM در زون ۳۹ واقع شده است و طول آن از ۳۱۱۳۴۰ تا ۳۱۶۵۹۰ متر و عرض آن از ۳۷۱۱۲۵۰ تا ۳۷۲۰۹۸۰ متر می‌باشد. متوسط دمای سالیانه ۱۶/۰۴ درجه سانتی‌گراد، بارش سالیانه ۶۶۴/۹۴ میلی‌متر و تبخیر سالیانه برابر با ۳۱۰۸/۷ میلی‌متر می‌باشد.

خصوصیات یا کلاس خاک با یکسری متغیرهای محیطی (متغیرهای کمکی) ارتباط داده می‌شود. به این صورت که در هر موقعیت مشاهده‌ی خاک، یک سری متغیرهای محیطی وجود دارد که همبستگی بالایی با خصوصیات یا کلاس‌های خاک دارند که یافتن این ارتباط و پیش‌بینی خصوصیات یا کلاس‌های خاک در نقاط دیگر، منجر به تهیه نقشه رقومی خاک در تمام منطقه مورد مطالعه می‌گردد. بنابراین جزء اصلی معادله اسکورپن برنامه یادگیری (مدل پیش‌بینی کننده)^۱ می‌باشد. برای پیش‌بینی خصوصیات خاک می‌توان از مدل‌های مختلفی از جمله رگرسیون چند متغیره (۲۵)، رگرسیون غیر خطی، شبکه عصبی مصنوعی (۳ و ۱۱) رگرسیون درختی (۳۸ و ۲۳)، سیستم فازی تطبیق پذیر مبتنی بر شبکه عصبی (۱۷) و الگوریتم ژنتیک (۲۶ و ۲۸) بهره گرفت. در این میان، مدل‌های درختی در مقایسه با سایر روش‌ها دارای مزایایی از جمله قابلیت تفسیر بالا، عدم وابستگی به داده‌های پرت، انعطاف پذیری به روابط غیرخطی و عدم وابستگی به توزیع داده‌ها می‌باشند (۲۴). اما نکته قابل توجه این است که نقشه برداری رقومی خاک، در حال حاضر تنها به پیش‌بینی متغیرهای خاک در عمق‌های مشخص شده می‌پردازد و کمتر به ویژگی تدریجی بودن تغییرات داخل خاک توجه دارد (۱۲ و ۳۵). این در حالی است که تغییرات خصوصیات خاک در عمق به صورت تدریجی می‌باشد (۲۹).

لذا محققین، توابع گسسته و پیوسته عمق خاک را با این رویکرد که بتوانند تغییرات تدریجی خاک را مدل‌سازی کنند توسعه داده‌اند. اگر از توابع عمق گسسته^۲، برای پیش‌بینی ویژگی خاک در عمق مشخص استفاده شود، اغلب با خطا همراه می‌باشد (۴). بنابراین تاکنون تلاش‌های بسیار زیادی جهت ایجاد توابع عمق پیوسته انجام شده است. اولین تلاش‌ها مربوط به بینی (۱۵) می‌شود که سعی در ترسیم منحنی دستی بین نقاط اندازه‌گیری شده افق‌ها نمود. با مرور زمان و ایجاد روش‌های آماری جدید، توابع عمقی نمایی متولد گردید (۳۲). مینازنی و همکاران (۲۳) اشاره داشتند که برازش منحنی‌های نمایی به داده‌های کربن آلی نتایج قابل قبولی را در پی داشته است. رگرسیون خطی و چندجمله‌ای‌های مرتبه ان‌ام از توابع عمقی بعدی بودند که توسط محققین مختلف ارائه گردید. اما نقطه ضعف این روش‌ها این بود که مقادیر ویژگی خاک در هر عمق بر روی شکل کل تابع تاثیر می‌گذاشت (۲۹). بنابراین انعطاف‌پذیر نبودن این روش‌ها باعث نتایج غیرواقعی از برازش مدل می‌شد. صرفنظر از نوع متغیر مورد بررسی، روش اسپیلاین مسطح شده^۳ (۹) و اسپیلاین با

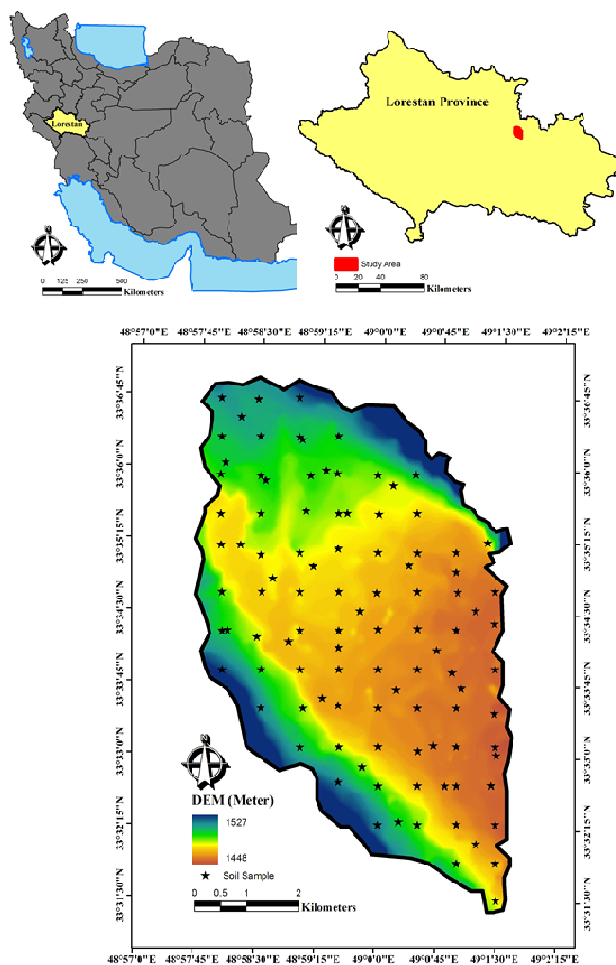
1- Predictive model

2- Discontinues functions

3- Smoothing splines functions

4- Equal-area spline functions

5- Knot



شکل ۱- پراکنش نقاط نمونه برداری شده بروی مدل رقومی ارتفاع

مدل اسکورپن

پایه و اساس نقشه برداری نوین مبتنی بر معادله اسکورپن^۱ (۲۰) می باشد (معادله ۱). در این معادله خصوصیات^۲ یا کلاس خاک^۳ با یک سری متغیرهای محیطی (متغیرهای کمکی^۴) ارتباط داده می شود. به این صورت که در هر موقعیت مشاهده‌ی خاک، یک سری متغیرهای محیطی وجود دارد که همبستگی بالایی با خصوصیات یا کلاس‌های خاک دارند که یافتن این ارتباط و پیش بینی خصوصیات یا کلاس‌های خاک در نقاط دیگر، منجر به تهیه نقشه رقومی خاک در تمام منطقه مورد مطالعه^۵ می گردد.

$$S_{c,a} = f(s, c, o, r, p, a, n) + e \quad (1)$$

بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بروجرد، این دشت عمدتاً از رسوبات آبرفتی شامل پادگانه‌های بلند و قدیمی، پادگانه‌های کم ارتفاع و جوان و رسوبات رودخانه‌ای مربوط به دوره کواترنر تشکیل شده است. آبرفت‌های عهد حاضر در این منطقه بسته به جایگاه رسوب گذاری، ترکیب و اندازه رسوبات و نوع گسترش متفاوت می باشند. رسوبات کفه رسی و آبرفت‌های رودخانه‌ای از انواع این رسوبات می باشند که در دشت سیلاخور و بستر رودخانه‌ها تشکیل می شوند. بر اساس داده‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی شهرستان دورود رژیم رطوبتی خاک‌های منطقه زریک و رژیم حرارتی آن‌ها ترمیک تعیین گردید. با توجه به مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و بر اساس سیستم رده بندی آمریکایی، خاک‌های منطقه در دو رده انتی-سول و اینسپتی-سول و چهار زیررده Calcixerepts، Xerofluvents، Xerorthents، Haploxerepts طبقه بندی گردیدند.

- 1- SCORPAN
- 2- Soil attributes
- 3- Soil class
- 4- Auxiliary variables
- 5- Area of interest

میانگین $f(x)$ در فاصله (x_i, x_{i-1}) و e_i مقدار خطای اندازه گیری شده با میانگین صفر می باشد. $f(x)$ که در حقیقت معادله اسپیلاین می باشد را می توان از کمینه کردن معادله ۳ بدست آوریم.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2 + \lambda \int_{x_0}^{x_n} [f_i(x)^2] dx \quad (3)$$

اولین جمله مقدار معادله برازش شده به داده واقعی را نشان می دهد و دومین جمله ناهمواری اسپیلاین را تعیین می کند. پارامتر λ نیز میزان انحنای منحنی را نشان می دهد. لازم به ذکر می باشد که ضریب لاندا در معادله اسپیلاین باید بهینه شود، بنابراین ضرایب مختلفی $(1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001)$ مورد استفاده قرار گرفت و نتایج برای برگزیدن بهترین لاندا مقایسه گردید. در حقیقت راه حل، اسپیلاین خطی - چندجمله ای می باشد. رابطه خطی مقادیر خصوصیت خاک را در بین لایه ها و رابطه چندجمله ای مقادیر خصوصیت خاک را درون لایه ها پیش بینی می کند. بعد از برازش دادن معادله اسپیلاین مورد نظر به هر یک از پروفیل های خاک مقادیر پارامتر مورد نظر در عمق های استاندارد ۵-۰، ۱۰-۵، ۳۰-۱۰، ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی متری مطابق با استاندارد جهانی خاک از معادله استخراج گردید.

داده های کمکی

بر اساس مدل اسکورپین در نقشه برداری رقومی خاک، علاوه بر داده های خاک نیاز به داده های کمکی می باشد. در پژوهش حاضر از مدل رقومی و بسایت مدل رقومی ارتفاع سازمان زمین شناسی آمریکا (قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر) استفاده گردید (۳۹). بعد از آماده کردن مدل رقومی ارتفاع، از آن برای استخراج اطلاعات کمکی یا تصاویر تخمین زنده متغیرهای ژنتیکی خاک استفاده گردید. پارامترهای پستی و بلندی از قبیل شیب، ارتفاع، ارتفاع بالای شبکه زهکشی^۱، مساحت حوزه های اصلاح شده^۲، موقعیت میانی شیب^۳، عمق دره^۴، شاخص خیزی^۵، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا^۶، شاخص بالای پشته با درجه تفکیک بالا^۷ و شیب حوزه در محیط سامانه جغرافیایی ساگا (SAGA GIS) محاسبه و استخراج گردید. روش استخراج تمام پارامترهای مزبور در روش ارائه شده توسط هنگل و روزیتر (۱۴) تشریح گردیده است. همچنین در این مطالعه از تصاویر ماهواره های سنجد + ETM استفاده گردید. تصاویر این سنجد به مربوط به تابستان ۱۳۹۲ می باشد. این تصویر از ۶ بانده (بانده: ۰/۴۵-۰/۵۲ میکرومتر، بانده: ۰/۵۲-۰/۶۰ میکرومتر، بانده: ۰/۶۳-۰/۶۹ میکرومتر)

در این معادله S_a : خصوصیات، S_c : کلاس خاک، S : مربوط به اطلاعات خاک که از نقشه خاک یا پایگاه داده یا دانش کارشناس به دست می آید. C : اقلیم، O : موجودات زنده از جمله فعالیت انسانی، T : پستی و بلندی یا توپوگرافی، P : مواد مادری، a : زمان و n : موقعیت مکانی می باشد. تابع f ، یک طبقه بندی نظارت شده یا برنامه یادگیری نظارت شده را نشان می دهد. تابع f برای پیش بینی خصوصیات خاک می تواند رگرسیون درختی (مینازنی و همکاران، ۲۰۰۷) باشد. بنابراین سه جزء اصلی معادله اسکورپین شامل داده های خاک، متغیرهای محیطی و برنامه یادگیری می باشد که متعاقباً مورد بحث قرار می گیرند.

داده خاک

در این تحقیق نمونه برداری از ۱۰۳ نقطه در منطقه انجام گرفت. برای برداشت نمونه ها ابتدا در محیط نرم افزار ArcGIS یک شبکه منظم به فواصل ۷۵۰ متر بر روی تصویر ماهواره ای ETM⁺ منطقه مورد نظر قرار داده شد. سپس بر اساس مختصات نقاط شبکه و با استفاده از دستگاه GPS محل نمونه ها در صحرا مشخص گردید. از این تعداد، ۷۵ نقطه بر اساس شبکه منظم برای حفر پروفیل و مته به صورت یک در میان، و ۲۸ نقطه به صورت تصادفی و در فواصل بین نقاط شبکه منظم برای حفر مته در نظر گرفته شد. سپس نمونه های خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی متری از محل های انتخاب شده برداشت شد و برای مطالعات بعدی به آزمایشگاه منتقل گردیدند. نمونه های خاک پس از خشک شدن کوبیده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. سپس تجزیه های فیزیکی و شیمیایی رایج بر روی آن ها انجام گرفت. بافت خاک به روش هیدرومتر، ماده آلی به روش والکلی و بلک و CEC به روش اشباع با استات آمونیم اندازه گیری شد. برای پیش بینی ظرفیت تبادل کاتیونی نیاز به استاندارد کردن اعماق خاک می باشد. برای نیل به این هدف، از معادله عمق خاک از نوع اسپیلاین با نواحی یکسان استفاده گردید (۱۸، ۴). این معادله اسپیلاین، حالت توسعه یافته مدل بی شاپ و همکاران (۴) می باشد. معادله ایشان تنها مقادیر خصوصیت خاک را در افق ها، میان گیری می کند. معادله بهبود یافته صورت ریاضی ظرفیت تبادل کاتیونی در هر عمقی بر اساس معادله ۲ محاسبه می شود:

$$y_i = f_i + e_i \quad (2)$$

در آن y_i مقدار پیش بینی شده در عمق i می باشد. باید در نظر گرفت که تغییرات خصوصیات خاک نسبت به عمق تدریجی تغییر می کند. این جمله را می توان به صورت ریاضی تبدیل کرد. فرض کنید که X عمق خاک؛ $f(x)$ تابع عمق که مقدار واقعی خاک را توصیف می کند. این نشان می دهد که تابع $f(x)$ و مشتقات آن پیوسته هستند و همچنین $f(x)$ مشتق پذیر می باشد. f_i مقدار

- 1- Altitude above channel network
- 2- Modified catchment area
- 3- Mid-slop position
- 4- Valley depth
- 5- Wetness index
- 6- Multi-resolution Valley Bottom Flatness
- 7- Multi-resolution Ridge Top Flatness

تمامی نمونه‌هایی که به گره مورد نظر می‌رسند تغییرات ناچیزی داشته باشد و یا تعداد کمی از نمونه‌ها باقی بمانند، متوقف می‌شود. کاهش انحراف معیار با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$SDR = sd(T) - \sum_i \frac{Ti}{T} \times sd(Ti) \quad (4)$$

در رابطه ۴ شامل نمونه‌هایی است که به گره رسیده‌اند و Ti مجموعه‌هایی است که از تقسیم کردن گره بر اساس صفت انتخابی به دست آمده‌اند. sd نیز انحراف معیار است. پس از ایجاد درخت، یک مدل رگرسیون خطی چندگانه ساخته می‌شود. این مدل بر اساس داده‌های وابسته به آن گره و تمامی صفاتی که در زیردرخت با ریشه آن گره مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ایجاد می‌شود. در مرحله بعد مدل‌های رگرسیون خطی، با کنار گذاشتن صفاتی که حذف آن‌ها باعث کاهش میانگین خطا می‌شود، ساده‌سازی می‌شوند. بعد از این ساده‌سازی، هر زیردرخت برای انجام عملیات هرس کردن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر خطای تخمین زده شده برای مدل خطی در ریشه زیردرخت، کوچک‌تر یا مساوی میانگین خطای درخت باشد، زیردرخت هرس می‌شود. بعد از عملیات هرس کردن، ناپیوستگی زیادی بین مدل‌های خطی مجاور در برگ‌های درخت هرس شده ایجاد می‌شود. در فرایند هموارسازی در $M5$ ، مدل نهایی در یک برگ از ترکیب کردن مدل به دست آمده که در آن برگ با مدل‌های موجود در مسیر ریشه تا برگ مربوطه، به دست می‌آید. لازم به ذکر می‌باشد که در مدل اسکورپین داده‌های ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق به عنوان متغیر وابسته و داده‌های محیطی به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند و مدل رگرسیون درختی ارتباط بین آن‌ها را بدست می‌آورد. برای ارزیابی مدل، در این بررسی، داده‌ها به دو دسته آموزش (۸۰ درصد از داده‌های نمونه‌برداری شده) و آزمون (۲۰ درصد از داده‌های نمونه‌برداری شده) به طور تصادفی تقسیم شدند. برای بررسی عملکرد مدل در برآورد متغیرهای وابسته (ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق استاندارد) از ضریب همبستگی و ریشه مربعات خطا استفاده گردید.

نتایج و بحث

خلاصه آماری داده‌ها

برای تهیه نقشه رقومی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به صورت سه بعدی ابتدا نیاز به دست آوردن ضریب لاندا مربوطه با معادله نواحی یکسان شده اسپیلاین یا معادله عمق خاک می‌باشد. برای نیل به این هدف ضرایب مختلف که دامنه‌ای از ۰/۰۰۰۰۱ تا ۱۰ داشتند مورد ارزیابی قرار گرفتند و بر اساس نتایج ارزیابی مدل بروی داده‌های آزمون و همچنین تفسیر بصری مدل‌های عمق خاک مشخص شد که ضریب لاندا ۰/۱ بسیار مناسب می‌باشد. ملانو و همکاران (۱۸) و

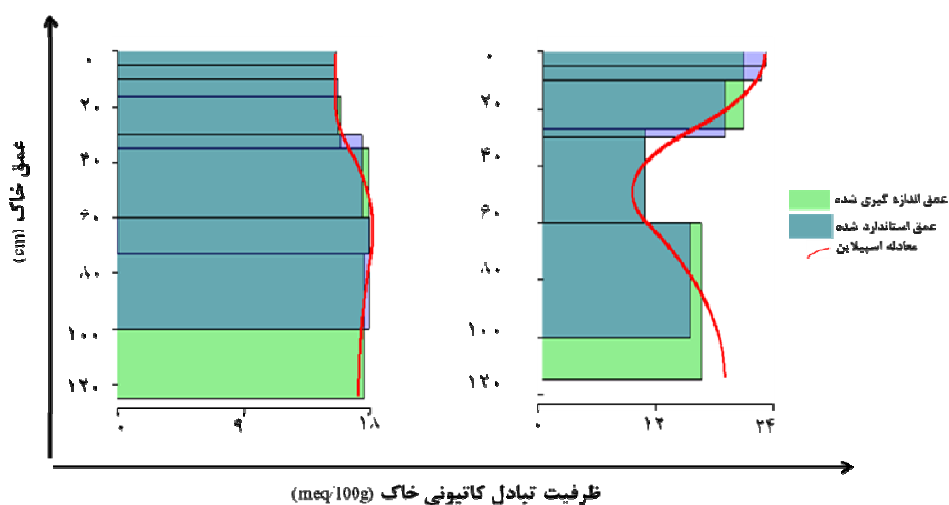
میکرومتر، باند ۴: ۰/۷۶-۰/۹۰ میکرومتر، باند ۵: ۱/۷۵-۱/۵۵ میکرومتر، باند ۷: ۲/۰۸-۲/۳۵ میکرومتر) تشکیل شده است. همچنین تمام لایه‌های اطلاعاتی یا کمکی به فرمت رستری با اندازه پیکسل ۹۰ متری مطابق با استاندارد جهانی خاک تهیه شدند و برای انجام فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مربوطه آماده شدند.

مدل مکانی

سومین جزء معادله اسکورپین مدل مکانی می‌باشد که در تحقیق حاضر از مدل درختی بهره گرفته شد. مدل درختی طبقه‌بندی و رگرسیون، یک روش ناپارامتری الگوریتمی است که قادر به پیش‌بینی متغیرهای کمی (ظرفیت تبادل کاتیونی خاک) یا متغیرهای طبقه‌بندی شده (کلاس‌های خاک) بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده کمی و کیفی است. برای اولین بار این روش توسط بریمن و همکاران (۵) گسترش داده شد. درخت تصمیم‌گیری یکی از جدیدترین روش‌های داده کاوی می‌باشد که مشاهدات و اندازه‌گیری‌های انجام شده در مورد مقادیر پارامترهای تاثیرگذار بر مقدار یک پدیده مورد نظر را به شکل قوانینی درآورده و از آن‌ها به منظور پیش‌بینی استفاده می‌کند. درخت تصمیم‌گیری با پرسش یک سری سوال و تعیین مقادیر ممکن برای جواب این سوال، داده‌های ورودی از ریشه را در مسیرهای موجود حرکت داده و در نهایت به یک برگ می‌رساند. داده‌های قرار گرفته در برگ همگی ویژگی یکسانی دارند و آن ویژگی برگ است. درختان تصمیم‌گیری به دو نوع طبقه‌بندی و رگرسیونی تقسیم می‌شوند به این صورت که اگر متغیر پاسخ مقداری گسسته باشد به آن طبقه‌بندی و زمانی که درخت مقادیر پیوسته را پیش‌بینی کند نوع رگرسیونی را به آن نسبت می‌دهند. این درختان اعداد را در گره‌های برگ پیش‌بینی می‌کنند و می‌توانند از مدل همبستگی خطی یا ثابت یا مدل‌های دیگر استفاده کنند. وظیفه یادگیری در درختان رگرسیون، پیش‌بینی اعداد حقیقی می‌باشد. جهت انجام فرآیند مدل‌سازی بر اساس روش مدل درختی نیاز به داده‌های اصلی (ظرفیت تبادل کاتیونی) و داده‌های کمکی می‌باشد. پس از آماده‌سازی این لایه‌های اطلاعاتی به صورت پیکسلی، داده‌ها وارد نرم‌افزار کیوبیست (۳۰) گردید و مدل درختی محاسبه گردید. در ابتدا الگوریتم مدل درختی $M5$ با تقسیم کردن فضای نمونه، به صورت برگشتی یک درخت رگرسیونی می‌سازد. این تقسیم‌سازی برای کمینه کردن تغییرات زیرمجموعه‌های درونی مقادیر از ریشه تا گره و از مسیر شاخه‌ها صورت می‌گیرد. تغییرات به وسیله انحراف معیار مقادیری که از ریشه به هر گره رسیده‌اند، با محاسبه کاهش خطای مورد انتظار که از آزمایش هر صفت در آن گره حاصل می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. صفتی که میزان کاهش خطای مورد انتظار را بیشینه کند، انتخاب می‌شود. فرایند جداسازی در صورتی که مقادیر خروجی

عمق آمده است. همان‌طور که نتایج آماری نشان می‌دهد مقدار میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق در حدود ۱۷ تا ۲۰ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم می‌باشد و با افزایش عمق مقدار آن کاسته می‌شود. این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش درصد ماده آلی با عمق باشد. در بررسی‌های انجام شده در خاک‌های منطقه اصفهان (۲) و خاک‌های مناطق خشک آمریکا (۱۹) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین درصد ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی به دست آمد. ضریب تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق تقریباً شبیه یکدیگر می‌باشد. در حقیقت ضریب تغییرات بالا بوده و گستره‌ای در حدود ۱۵ تا ۲۵ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم را دارند.

ادگرز و همکاران (۲۷) نیز از معادلات عمق اسپیلاین با نواحی یکسان استفاده نمودند و این معادله را یکی از بهترین روش‌ها برای تهیه نقشه‌های سه بعدی متغیرهای خاک معرفی کردند. ملانو و همکاران (۱۸) بیان داشتند که یکی از بهترین روش‌ها برای تشخیص بهترین ضریب لاندا روش چشمی است و همچنین ایشان نتیجه گرفتند که ضریب لاندا مناسب بستگی زیادی به ماهیت و نوع متغیر مورد مطالعه دارد. در شکل ۲ معادله برازش داده شده به مقادیر عمقی دو نمونه خاک با ضریب لاندا ۰/۱ مشاهده می‌شود. پس از به دست آوردن معادله، مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق (۵-، ۱۰-، ۳۰-، ۶۰-، ۱۰۰-، ۶۰۰- سانتی‌متر) استخراج شدند. در جدول ۱ خلاصه آماری داده‌های ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج



شکل ۲- معادله عمق از نوع اسپیلاین با نواحی یکسان

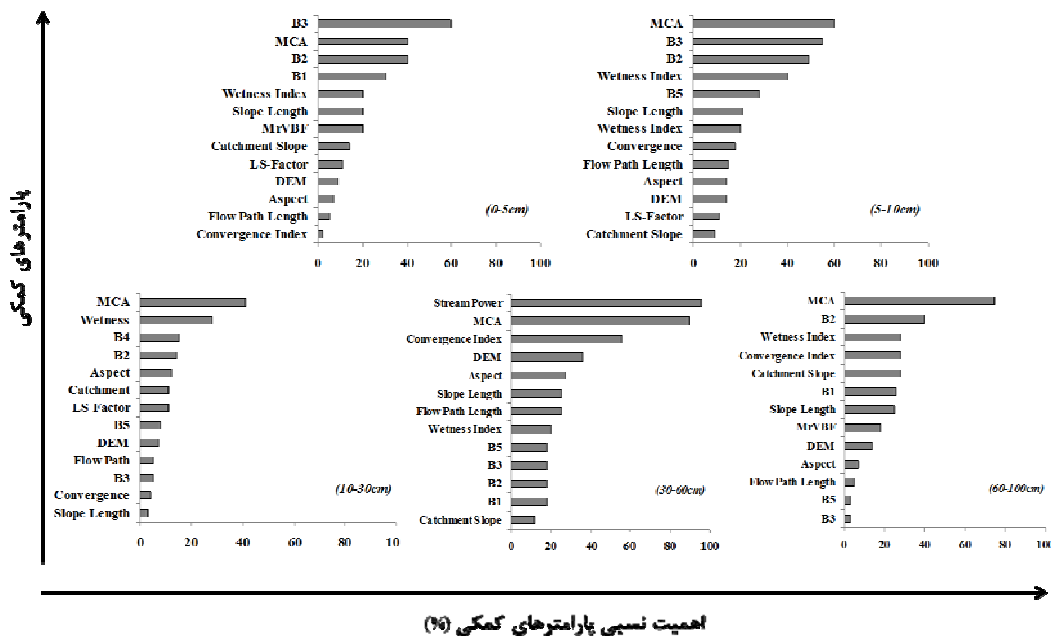
جدول ۱- پارامترهای آماری مربوط به مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق استاندارد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در کل منطقه مورد مطالعه

لايه (سانتی متر)	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چارک اول	چارک دوم	چارک سوم
CEC(۵-)	۵/۱	۳۶/۴	۲۰/۸	۵/۲	۲۵/۳	۱۷/۳	۲۱/۹	۲۴/۳
CEC(۵-۱۰)	۵/۶	۳۵/۹	۲۰/۷	۵/۱	۲۴/۸	۱۷/۴	۲۱/۸	۲۴/۱
CEC(۱۰-۳۰)	۹/۴	۳۱/۵	۲۰/۱	۴/۲	۲۱/۱	۱۸/۰	۲۱/۲	۲۲/۷
CEC(۳۰-۶۰)	۱۰/۹	۲۳/۳	۱۸/۵	۲/۹	۱۵/۷	۱۸/۳	۱۹/۷	۲۰/۲
CEC(۶۰-۱۰۰)	۹/۳	۲۳/۳	۱۷/۴	۲/۷	۱۵/۵	۱۶/۳	۱۷/۷	۱۹/۲
رس (درصد)	۱۱/۱۳	۶۶/۳۱	۴۲/۸۸	۱۲/۵۹	۳۲/۲۶	-/۳۸	۴۷/۲۵	۵۳/۰۰
سیلت (درصد)	۲۱/۴۲	۴۹/۲۵	۳۵/۱۹	۵/۰۳	۱۸/۶۶	-/۳۱	۳۴/۰۰	۳۸/۰۰
شن (درصد)	۶/۸۳	۵۸/۷۱	۲۱/۸۵	۱۱/۶۴	۶۱/۶۸	۱۲/۵	۱۷/۲۵	۲۶/۶۲
کربن آلی (درصد)	۰/۴۵	۲/۳۰	۱/۲۰	-/۳۸	۵۸/۶۶	-/۸۲	۱/۱۵	۱/۸۱
آهک (درصد)	۹/۴۵	۴۸/۳۸	۲۱/۸۵	۹/۳۹	۴۶/۳۳	۱۳/۹۷	۲۱/۰۲	۳۱/۱۶
شوری (dSm ⁻¹)	۰/۴۴	۷/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۱	۱۰۳/۲۷	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۹۰

پیش‌بینی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک

برای تهیه نقشه رقمی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک از اطلاعات محیطی مانند اجزاء سرزمین و تصویر ماهواره ETM+ استفاده گردید. نتایج مدل درختی نشان داد که بعضی از متغیرهای محیطی دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. البته میزان این اهمیت در پنج عمق خاک متفاوت می‌باشد. در شکل ۳ درصد اهمیت متغیرهای استفاده شده در مدل‌های درختی پنج عمق خاک ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در عمق بالای خاک (۵-۰ سانتی‌متر) باند سه تصویر ماهواره‌ای بیشترین اهمیت را داشته است، درحالی‌که در عمق‌های پایین‌تر مساحت اصلاح شده حوضه رتبه اول را به خود اختصاص داده است. اکرم‌خاموف و همکاران (۱) نشان دادند که اجزاء سرزمین

کم‌ترین همبستگی را با داده‌های خاک دارند و علت را مربوط به هموار بودن منطقه مورد مطالعه دانستند. به‌علاوه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تصاویر ماهواره مهم‌ترین پارامتر مخصوصاً در خاک‌های سطحی می‌باشند (۱۰-۰ سانتی‌متر). با توجه به بالاتر بودن ماده آلی در لایه‌های سطحی خاک منطقه، حضور و تجمع ماده آلی به عنوان یک فاکتور اساسی در تعیین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در این لایه‌ها به راحتی توسط باندهای ماهواره‌ای ETM+ شناسایی شده است. محققین مختلفی کارایی بالای تصاویر ماهواره‌ای را در شناسایی خصوصیات خاک بخصوص مواد آلی گزارش کرده‌اند (۶، ۷ و ۲۱).



اهمیت نسبی پارامترهای کمکی (%)

شکل ۳- نتایج اهمیت متغیرهای محیطی در پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق استاندارد (B1, B2, B3, B4 و B5 باندهای تصویر ماهواره، Aspect جهت شیب، Slope length طول شیب، DEM مدل رقمی ارتفاع، MCA مساحت اصلاح شده حوضه، MrVBF شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، CI شاخص رس، CS شیب حوضه، VD عمق دره، MrRTF شاخص بالای پشته با درجه تفکیک بالا، ارتفاع بالای شبکه زهکشی، Wetness Index شاخص خبسی، Stream power قدرت جریان رودخانه، catchment slope شیب حوضه، lengthFlow path طول مسیر جریان، LS-Factor فاکتور طول و شیب، Convergence index شاخص همگرایی)

مربعات ۱/۷۵ و ۱/۸۴ می‌باشد. نتایج میانگین خطا نیز نشان می‌دهد که اندکی انحراف منفی (یا بیش‌برازش) در همه لایه‌های خاک وجود دارد. همچنین نمودار پراکنش نقاط اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی شده توسط مدل در شکل ۴ ارائه شده است. این گراف‌ها نشان می‌دهند که بالاترین دقت پیش‌بینی مربوط به عمق‌های سطحی خاک (۳۰-۰ سانتی‌متر) می‌باشد، در حالی‌که مدل رگرسیون

با استفاده از متغیرهای کمکی که توسط مدل رگرسیون درختی انتخاب گردید (شکل ۳) اقدام به برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق گردید. نتایج ارزیابی مدل‌ها بر اساس معیارهای ریشه مربعات خطا، میانگین خطا و ضریب تبیین در جدول ۲ آورده شده است. مطابق با این جدول مشخص می‌شود که بهترین تخمین مربوط به خاک‌های سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) با دامنه میانگین ریشه

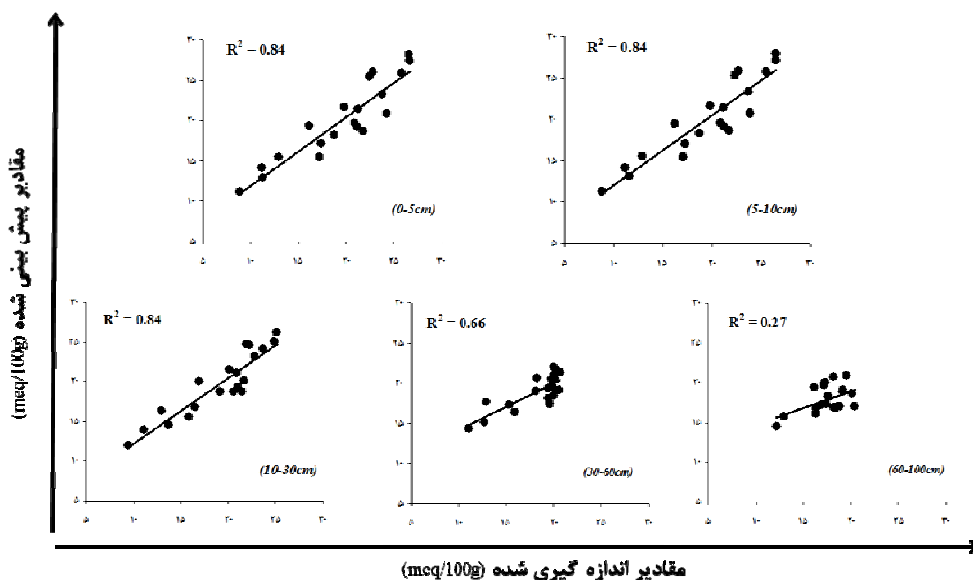
مشابه‌ای از ضریب تبیین را گزارش داده‌اند. ملانو و همکاران (۱۸) بیان داشتند که در نقشه‌برداری رقومی ضریب تبیین بالاتر از ۰/۷۰ کمتر و ضریب تبیین پایین‌تر از ۰/۵۰ بیشتر معمول می‌باشد (۱۸). بنابراین نتایج به دست آمده از این تحقیق برای ۴ عمق بالایی خاک قابل قبول است ولی برای عمق پنجم که ضریب تبیین برابر با ۰/۲۷ به دست آمد زیاد قابل اعتماد نمی‌باشند.

با توجه به قوانینی که از مدل رگرسیون درختی به دست آمد، اقدام به پیش‌بینی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در کل منطقه مورد مطالعه در پنج عمق گردید (شکل ۶). همان‌طور که در این اشکال مشخص است بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بخصوص در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری در مناطق شمالی و جنوب منطقه قرار گرفته است. دلیل بالا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در این بخش‌ها مناسب‌تر بودن شرایط خاک برای رشد گیاهان زراعی و بومی و در نتیجه بالاتر بودن درصد ماده آلی خاک می‌باشد.

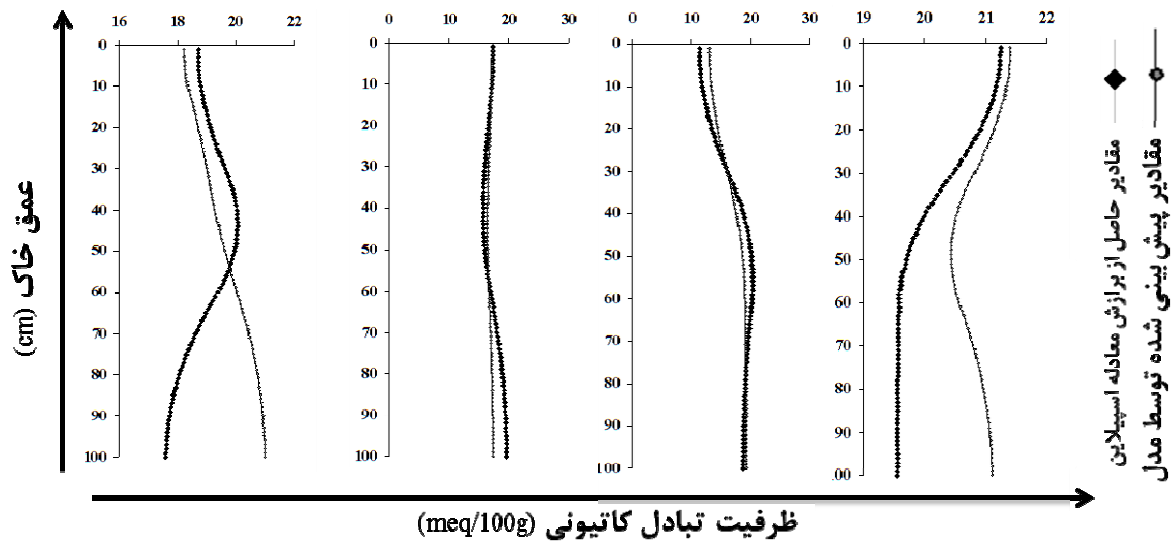
درختی بدترین پیش‌بینی را برای عمق پنجم با میانگین ریشه مربعات ۲/۱۶ داشته است (۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر). این مسئله نشان دهنده این نکته می‌باشد که مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی قادر به برقراری ارتباط مناسب با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در اعماق خاک نمی‌باشند. به عنوان نمونه گراف‌های مقادیر معادله اسپلاین و مقادیر پیش‌بینی شده ظرفیت تبادل کاتیونی خاک توسط مدل رگرسیون درختی برای ۴ نقطه مطالعاتی در شکل ۵ ارائه گردیده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود می‌توان تصویری از تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را به صورت عمودی از سطح خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر داشته باشیم. به نظر می‌رسد که مدل رگرسیون درختی انتخاب شده به خوبی توانسته است که نقشه رقومی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را در سه بعد شبیه‌سازی کند. مقادیر ضریب تبیین از سطح تا عمق چهارم خاک دامنه‌ای در حدود ۰/۶۶ الی ۰/۸۴ دارند که در مقایسه با نتایج سایر محققین دامنه‌ای قابل قبول می‌باشد. رایان و همکاران (۳۳)، فلورنسکی و همکاران (۱۰) و ملانو و همکاران (۱۸) نتایج

جدول ۲- نتایج معیارهای ارزیابی خطا بر اساس روش رگرسیون درختی (آزمون)

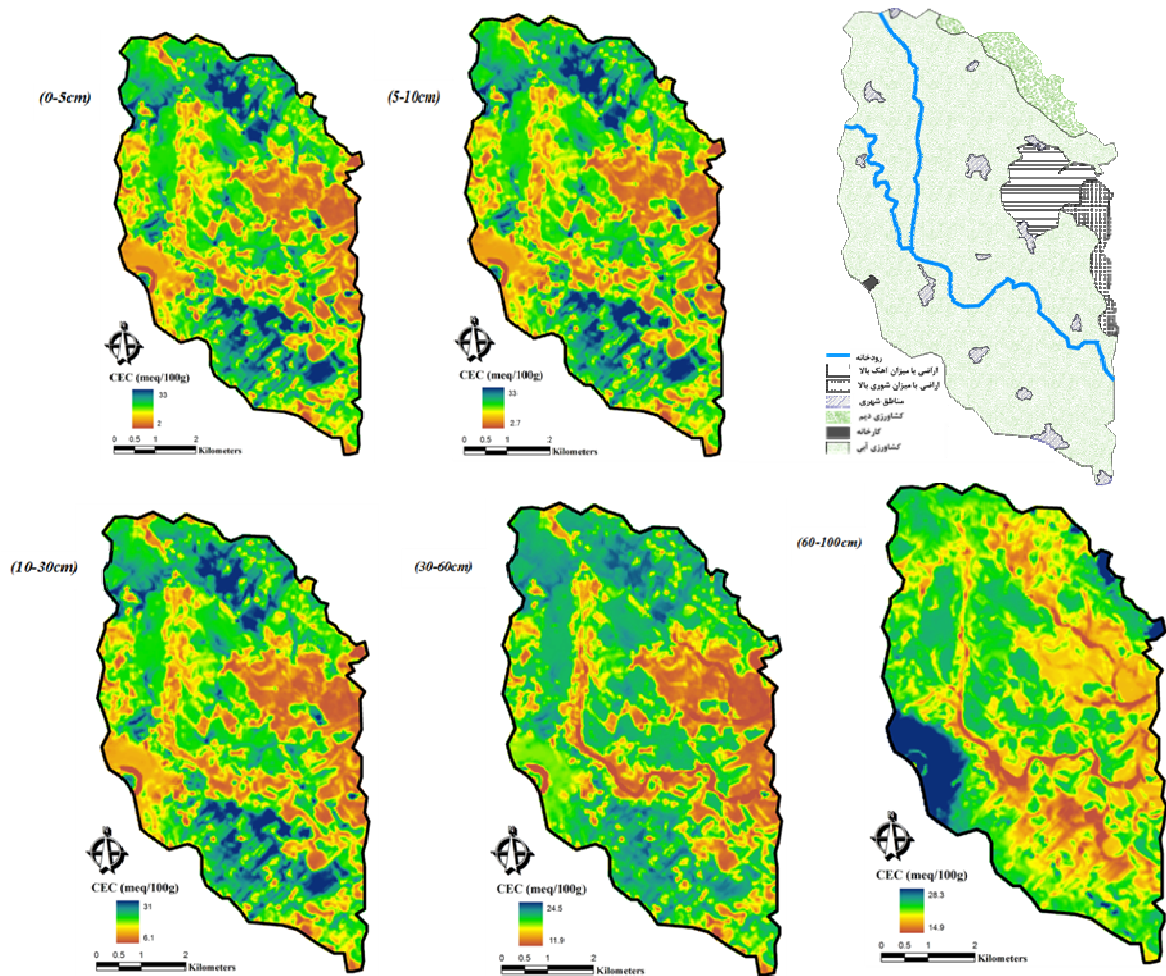
عمق (سانتی‌متر)	ریشه مربعات خطا	ضریب تبیین	میانگین خطا
CEC (۰-۵)	۱/۷۵	۰/۸۴	-۰/۳۹
CEC (۵-۱۰)	۱/۸۴	۰/۸۴	-۰/۵۴
CEC (۱۰-۳۰)	۱/۸۴	۰/۸۴	-۰/۵۲
CEC (۳۰-۶۰)	۲/۱۱	۰/۶۶	-۰/۶۵
CEC (۶۰-۱۰۰)	۲/۱۶	۰/۲۷	-۰/۶۹



شکل ۴- نتایج پراکنش مقادیر اندازه‌گیری شده ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مقابل شبیه‌سازی شده



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل شبیه‌سازی شده تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری بوسیله مدل رگرسیون درختی و اسپیلاین (داده‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شدند)



شکل ۶- نقشه رقومی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در پنج عمق استاندارد و کاربری اراضی

اسکورپین گردید. اجرای این مدل سه مرحله دارد. گام اول: تهیه داده‌های خاک: در این پژوهش اقدام به نمونه‌برداری از خاک‌های منطقه (۱۰۳ نقطه) گردید. پس از اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک‌ها، معادلات اسپیلاین با نواحی یکسان به داده برآش داده شد تا مقادیر در عمق‌های استاندارد محاسبه و استخراج شوند. گام دوم: تهیه اطلاعات محیطی: در پژوهش حاضر از انواع منابع داده‌های کمکی یا نمایندگان فاکتورهای خاکسازی از قبیل اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و اجزاء سرزمین (مثل شاخص خیسبی) بهره گرفته شد. گام سوم: داده‌کاوی: ارتباط دادن پارامترهای محیطی و داده‌های خاک که از تکنیک‌رگرسیون درختی استفاده نمود. نتایج کلی این تحقیق را می‌توان به این صورت ارائه داد:

کاربرد همزمان معادلات عمق خاک (اسپیلاین با نواحی یکسان) و مدل نقشه‌برداری رقومی (رگرسیون درختی) به ما اجازه داده که به راحتی بتوان به بررسی تغییرات عمقی و سطحی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بپردازیم.

باند سه تصویر ماهواره‌ای و مساحت حوزه اصلاح شده مستخرج از مدل رقومی ارتفاع به عنوان مهم‌ترین پارامترهای انتخاب شده توسط مدل رگرسیون درختی جهت پهنه‌بندی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌باشند.

با افزایش عمق خاک میزان درصد استفاده شده از اطلاعات ماهواره‌ای کاسته و در مقابل درصد اجزاء سرزمین در مدل پیش‌بینی مکانی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک افزایش پیدا کرده است.

تکنیک‌های پدومتری یا به عبارت دیگر تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک می‌توانند فرآیند نقشه‌برداری خاک‌ها را در گستره‌ای وسیع و متشکل از هر گونه عوارض طبیعی به یک‌باره انجام داده، روش سنتی را ارتقاء بخشیده، سرعت عمل و کارآمدی نقشه‌ها را در انتقال داده‌ها و اطلاعات افزایش داده و قابلیت استفاده آن‌ها را برای قشر وسیعی از شاخه‌های علمی امکان‌پذیر نماید.

همچنین بالا بودن درصد رس نیز می‌تواند عامل دیگر برای بالا بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در این بخش‌ها باشد. پایین بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در بخش شرقی منطقه احتمالاً مربوط به درصد بالای آهک موجود در خاک این اراضی و عدم دخالت آن در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌باشد. پایین بودن ظرفیت تبادل کاتیونی در سایر قسمت‌ها می‌تواند مربوط به بافت درشت‌تر خاک در دو طرف بستر دو رودخانه تیره و کول آباد باشد که در منطقه جریان دارند. امینی و همکاران (۲) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی به دست آوردند. در اعماق پایین‌تر (عمق پنجم) روند تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی متفاوت است که این می‌تواند به دلیل پایین‌تر بودن دقت مدل در پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی در این اعماق و همچنین متفاوت بودن بافت خاک در این اعماق به دلیل رسوبی بودن منطقه باشد. به هر حال جهت ارزیابی تناسب اراضی برای بیشتر گیاهان (باغی و زراعی) نیاز به اطلاعات دقیق از خاک بخصوص ظرفیت تبادل کاتیونی خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد تنها راه عملی و کاربردی برای مدل‌سازی سه بعدی (تغییرات سطحی و عمق) خاک استفاده همزمان از نقشه‌برداری رقومی خاک و معادلات عمق خاک باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که رگرسیون درختی به عنوان مدل پیش‌بینی کننده و معادله اسپیلاین با نواحی یکسان ابزاری قدرتمند در جهت برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به صورت سطحی و عمقی می‌باشد. ملانو و همکاران (۱۸)؛ ادگرز و همکاران (۲۷) و تقی‌زاده و همکاران (۳۷) نیز از تکنیک مشابه برای بررسی تغییرات مکانی و عمقی کربن آلی و شوری خاک استفاده کردند.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اقدام به تهیه نقشه رقومی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در منطقه درود استان لرستان بر اساس چارچوب کاری

منابع

- 1- Akramkhanov A., Martius C., Park S.J., and Hendrickx J.M. 2011. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. *Geoderma*, 163: 55-62.
- 2- Amini M., Abbaspour K.C., Khademi H., Fathianpour N., Afyuni M., and Schulin R. 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran. *European J. Soil Sci.*, 56: 551-559.
- 3- Baker L., and Ellison D. 2008. Optimization of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, 144: 212-224.
- 4- Bishop T.F.A., McBratney A.B., and Laslett G.M. 1999. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing splines. *Geoderma*, 91: 27-45.
- 5- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., and Stone C.J. 1984. *Classification and regression*. Tress. Wadsworth, Belmont, CA.
- 6- Dehni A., and Lounis M. 2012. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Pro. Engi.* 33: 188- 198.
- 7- Dwivedi R.S., and Sreenivas K. 1998. Delineation of salt-affected soils and waterlogged areas in the Indo-Gangetic

- plains using IRS-1C LISS-III data. *I. J. Rem. Sens.*, 14: 2739- 2751.
- 8- Elnaggar A.A. 2007. Development of predictive mapping techniques for soil survey and salinity mapping. Ph.D. dissertation, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
 - 9- Erh K.T. 1972. Application of spline functions to soil science. *Soil Sci.*, 114: 333-338.
 - 10- Florinsky I.V., Eilers R.G., Manning G.R., and Fuller L.G. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Env. Modell. Soft.* 17: 295- 311.
 - 11- Ghanbarian-Alavijeh B., Taghizadeh-Mehrjardi R., and Huang G. 2012. Estimating Mass Fractal Dimension of Soil Using Artificial Neural Networks for Improved Prediction of Water Retention Curve. *Soil Sci.*, 177: 471-479.
 - 12- Grimm R., Behrens T., Marker M., and Elsenbeer H. 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island — digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146: 102-113.
 - 13- Grunwald S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modelling approaches. *Geoderma*, 152: 95-207.
 - 14- Hengl T., Rossiter D. G., and Stein A. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Geoderma*. 120: 75-93.
 - 15- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.
 - 16- Lagacherie P. 2008. Digital soil mapping: a state of the art. P. 3-14. In: A. E. Hartemink et al. (ed.) *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Science, Australia.
 - 17- MacMillan R.A., Moon D.E., and Coupé R.A. 2007. Automated predictive ecological mapping in a forest region of B.C., Canada, 2001-2005. *Geoderma*, 140: 353-373.
 - 18- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154: 138-152.
 - 19- Manrique L.A., Jones C.A., and Dyke P.T. 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 787-794.
 - 20- McBratney A.B., Mendonça-Santos M.L., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3- 52.
 - 21- Metternicht G., and Zinck J.A. 2003. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Rem. Sens. Env.* 85: 1-20.
 - 22- Minasny B., McBratney A.B., and Hartemink A.E. 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155: 132-139.
 - 23- Minasny B., McBratney A.B., Mendonca-Santos M.L., Odeh I.O.A., and Guyon B. 2006. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Aus. J. Soil Res.*, 44: 233-244.
 - 24- Moran C.J., and Bui E.N. 2002. Spatial data mining for enhanced soil map modelling. *I. J. Geo. Info. Sci.*, 16: 533-549.
 - 25- Nyssen J., Tmesgen H., Lemenih M., Zenebe A., Haregeweyn N., and Haile M. 2008. Spatial and temporal variation of soil organic carbon stocks in a lake retreat area of the Ethiopian Rift Valley. *Geoderma*, 146: 261-268.
 - 26- Odeh I.O.A., and Onus A. 2008. Spatial Analysis of Soil Salinity and Soil Structural Stability in a Semiarid Region of New South Wales, Australia. *Env. Manag.*, 42: 265-278
 - 27- Odgers N.P., Libohova Z., and Thompson J.A. 2012. Equal-area spline functions applied to a legacy soil database to create weighted-means maps of soil organic carbon at a continental scale. *Geoderma*, 190: 153-163.
 - 28- Parasuraman K., Elshorbagy A., and Si S.C. 2008. Estimating saturated hydraulic conductivity using genetic programming. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1676-1684.
 - 29- Ponce-Hernandez R., Marriott F.H.C., and Beckett P.H.T. 1986. An improved method for reconstructing a soil-profile from analysis of a small number of samples. *J. Soil Sci.*, 37: 455-467.
 - 30- Quinlan J.R. 2001. *Cubist: An Informal Tutorial*. <http://www.rulequest.com>.
 - 31- Rossiter D.G., Geomatica S., and Bogota S. 2005. Digital soil mapping: towards a multiple-use soil information system. *I. J. Geo-inform. Sci.*
 - 32- Russell J.S., and Moore A.W. 1968. Comparison of different depth weightings in the numerical analysis of anisotropic soil profile data: *Transactions of the 9th International Congress of Soil Science*, vol. 4, pp. 205-213.
 - 33- Ryan P.J., McKenzie N.J., O'Connell D., Loughhead A.N., Leppert P.M., Jacquier D., and Ashton L. 2000. Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. *Forest Eco. Manag.* 138: 139-157.
 - 34- Scull P., Franklin J., Chadwick O.A., and McArthur D. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Physical Geog.*, 27: 171-197.
 - 35- Stoorvogel J.J., Kempen B., Heuvelink G.B.M., and Bruin S. 2009. Implementation and evaluation of existing knowledge for digital soil mapping in Senegal. *Geoderma*, 149: 161-170.
 - 36- Sulaeman Y., Sarwani M., Minasny B., McBratney A.B., Sutandi A., and Barus B. 2012. Soil-landscape models to predict soil pH variation in the Subang region of West Java, Indonesia. P. 317-325. In B. Minasny et al. (ed). *Digital Soil Assessment and Beyond*. CRC Press.
 - 37- Taghizadeh-Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., and Malone P.B. 2014. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*, 213: 15-28.

- 38- Vasques G.M., Grunwald S., and Sickman J.O. 2009. Modeling of soil organic carbon fractions using visible/near-infrared spectroscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73: 176–184.
- 39- www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database
- 40- Zhu A.X., Hudson B., Burt J., Lubich K., and Simonson D. 2001. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1463–1472.

3D Digital Mapping of Soil Cation Exchange Capacity in Dorud, Lorestan Province

R. Taghizadeh Mehrjerdi^{1*}- A. Amirian Chekan²- F. Sarmadian³

Received:03-11-2013

Accepted:16-09-2014

Abstract

There is an increasing demand for reliable large-scale soil data to meet the requirements of models for planning of land-use systems, characterization of soil pollution, and prediction of land degradation. Cation exchange capacity (CEC) is among the most important soil properties that are required in soil databases. This paper applied a novel method for whole-soil profile predictions of CEC (to 1 m) across Dorud located in Lorestan Province. At present research, we combined equal-area spline depth functions with digital soil mapping techniques to predict the vertical and lateral variations of CEC across the study area where limited soil information exists (103 soil profiles). To model the relationship between CEC and environmental factors (i.e. Representative soil forming factors), derived from a digital elevation model and Landsat imagery, a regression tree was applied. Results indicated that some auxiliary data had more influence on the prediction model (i.e. B3 and modified catchment area). Our results also confirmed the regression tree model predicted target variable at the five specific depths with coefficient of determination of 0.84, 0.84, 0.84, 0.66, 0.27 and root mean square of 1.75, 1.84, 1.84, 2.11, and 2.16, respectively. Results showed a reasonable R^2 in first four depths ranged from 0.66 to 0.84; while, it decreases to 0.27 in the last depth. Our results also confirmed that the regression tree as a predictive model, digital soil mapping technique and equal area splines are powerful tools to predict lateral and vertical variation of CEC.

Keywords: Regression tree, Soil depth function, Digital soil mapping

1-Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan

(*- Corresponding Author Email: Rh_taghizade@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatamolanbia University of Technology

3- Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran