



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و سوم، شماره اول، ۱۳۹۵  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی برخی از ویژگی‌های خاک سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز مرک، استان کرمانشاه)

\*شاهرخ فاتحی<sup>۱</sup>، جهانگرد محمدی<sup>۲</sup>، محمدحسن صالحی<sup>۳</sup>، عزیز مؤمنی<sup>۳</sup>،  
نورایر تومانیان<sup>۴</sup> و اعظم جعفری<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه خاک‌شناسی، دانشگاه شهرکرد، استاد گروه خاک‌شناسی، دانشگاه شهرکرد، <sup>۲</sup> دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب،  
<sup>۳</sup> استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، <sup>۴</sup> استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان  
تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۱۵

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از نیازهای اساسی کاربران و برنامه‌ریزان بخش کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست نقشه رقومی ویژگی‌های خاک با قدرت تفکیک مکانی ریز است. اما در کشور، از یک سو با کمبود چنین داده‌هایی مواجه هستیم و از سوی دیگر تهیه این گونه داده بسیار پرهزینه است. در چنین شرایطی، ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی خاک به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تهیه نقشه‌هایی با اندازه پیکسل ریز مطرح می‌گردد. هدف از این پژوهش، بررسی و ارزیابی تهیه نقشه‌های رقومی با اندازه پیکسل ۱۰ متر از نقشه‌های رقومی ویژگی‌های سطحی خاک با اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر با استفاده از روش ریزمقیاس‌سازی مستقیم در سطح ۲۴۰۰۰۰ هکتار از اراضی زیر حوضه آبخیز مرک واقع در استان کرمانشاه بود.

**مواد و روش‌ها:** ابتدا ساختار مکانی ویژگی‌های خاک سطحی شامل درصد شن، درصد سیلت، درصد رس، درصد کربن آلی، درصد کربنات کلسیم معادل و درصد سنگریزه بر اساس داده‌های میراثی خاک (۳۲۰ نمونه با توزیع تصادفی نامنظم) در کل ناحیه مورد مطالعه، با ترسیم تغییرنا و برازش مدل مناسب تعیین گردید. سپس نقشه کریجینگ بلوکی ویژگی‌های مورد نظر در اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر تهیه شد. اجزاء سرزمین، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و کاربری اراضی به‌عنوان متغیرهای کمکی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور انتخاب متغیرهای کمکی تأثیرگذار بر متغیر هدف، از ضریب همبستگی استفاده شد. متغیرهای کمکی که در سطح ۰/۰۱ با ویژگی‌های مورد مطالعه خاک همبستگی معنی‌دار داشتند؛ برای ورود به فرایند مدل‌سازی انتخاب شدند. سپس از روش مستقیم برای ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های مذکور استفاده شد. در این روش، ابتدا از طریق مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و درختان رگرسیون به سادگی رابطه بین خصوصیات خاک و متغیرهای کمکی (هر دو با اندازه پیکسل درشت) شناسایی می‌گردد و سپس از پارامترهای واسنجی مدل و ویژگی‌های محیطی با اندازه پیکسل ریز برای پیش‌بینی خصوصیات خاک در اندازه پیکسل ریز استفاده می‌شود. آموزش مدل‌ها بر اساس ۷۵ درصد داده‌های ساپورت بلوکی منطبق با داده‌های اولیه و ارزیابی نتایج بر اساس ۲۵ درصد بقیه داده‌ها به روش اعتبارسنجی کا مرتبه با کای معادل ۴ انجام شد.

\* مسئول مکاتبه: [shahrokh.fatehi@gmail.com](mailto:shahrokh.fatehi@gmail.com)

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد مقدار شن کم‌ترین و مقدار سنگریزه بالاترین همبستگی با متغیرهای کمکی دارند. با در نظر گرفتن همه اندازه پیکسل‌ها، بیش‌ترین همبستگی بین ویژگی‌های خاک و ارتفاع، مدت تابش، تحدب، شیب، شاخص خیزی توپوگرافی و شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا مشاهده شد. ریزمقیاس‌سازی سنگریزه با استفاده از روش مدل‌های خطی تعمیم‌یافته از اندازه پیکسل ۵۰ متر به ۱۰ متر بهترین کارایی را نشان داد (ریشه میانگین مربعات خطای ۵.۵۷٪). ریزمقیاس‌سازی شن، رس، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی از اندازه پیکسل ۲۵۰ و سیلت از اندازه پیکسل ۵۰ متر به اندازه پیکسل ۱۰ متر با روش درختان رگرسیون منجر به برآورد کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات (به ترتیب ۳/۹٪، ۳٪، ۴/۳۹٪، ۰/۲۱٪ و ۲/۳۱٪) خطا گردید. همچنین نتایج نشان داد که درختان رگرسیون در ریزمقیاس‌سازی ویژگی‌های خاک با اندازه پیکسل مختلف بهتر عمل می‌کند.

**نتیجه‌گیری:** به نظر می‌رسد روش مستقیم توانسته است نقشه رقومی برخی متغیرهای خاک (مانند سیلت، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی و درصد سنگریزه) را با صحت و کارایی قابل‌قبولی ریزمقیاس نماید. بدیهی است همبستگی قوی بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی سبب افزایش کارایی مدل‌ها و صحت نقشه‌های ریزمقیاس شده می‌گردد. همچنین مشخص گردید متغیرهای کمکی در اندازه پیکسل‌های مختلف، وابستگی متفاوتی با متغیر هدف دارند که بر کارایی ریزمقیاس‌سازی اثر می‌گذارد.

**واژه‌های کلیدی:** ریزمقیاس‌سازی، نقشه‌برداری رقومی خاک، متغیرهای کمکی، ویژگی‌های خاک

## مقدمه

مواقع به دلیل هزینه زیاد جمع‌آوری و تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌های خاک، با تعداد نمونه کم و به تبع آن فاصله زیاد نمونه‌ها مواجه هستیم. این عوامل در نهایت منجر به تولید نقشه‌های پیش‌بینی با اندازه پیکسل درشت می‌شود که جواب‌گوی اکثر نیازهای کاربران و تصمیم‌سازان نیست. به همین سبب، در شرایطی که جمع‌آوری دوباره نمونه‌های خاک بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است و اطلاعات خاک موجود در گزارش‌های خاکشناسی (داده‌های میراثی<sup>۱</sup>) نیاز کاربران را رفع نمی‌نماید، استفاده از ریزمقیاس‌سازی مکانی<sup>۲</sup> گزینه مناسبی برای تهیه نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز کاربر در اندازه پیکسل مناسب خواهد بود (۲۰).

مدل‌سازی و نقشه‌برداری رقومی خاک، بر اساس داده‌های رقومی با فرمت رستری و اندازه پیکسل مشخص صورت می‌گیرد. بنابراین در مبحث

نقشه‌های ویژگی‌های خاک هنگامی در مدیریت و بهره‌برداری از اراضی و مدل‌سازی محیطی قابل استفاده هستند که تغییرپذیری ویژگی‌های خاک را در قدرت تفکیک مکانی (اندازه پیکسل) مناسب نشان دهند. توسعه روش‌های مختلف پدومتری طی سالیان اخیر این امکان را فراهم آورده که این گونه نقشه‌ها تحت عنوان کلی نقشه‌های رقومی خاک برای کاربران مختلف تهیه گردند (۹). در اوایل دهه اخیر در ایران نیز برخی از پژوهشگران با استفاده از روش‌های مختلف آماری و داده کاوی، اقدام به تهیه نقشه‌های پیش‌بینی خصوصیات و کلاس‌های خاک نموده‌اند (۲، ۱۳، ۱۴، ۲۸، ۲۹). نقشه‌های رقومی خاک حاصل مدل‌سازی داده‌های نقطه‌ای خاک به کمک روش‌های مختلف پدومتری هستند و اندازه پیکسل نقشه خروجی متأثر از فاصله نمونه‌ها، تراکم نمونه‌برداری و اندازه پیکسل متغیرهای کمکی می‌باشد (۱۱)؛ اما در اکثر

1- Legacy data  
2- Downscaling

متغیرهای کمکی و از یک الگوریتم تکرارپذیر شامل تطبیق و برازش، برای بهینه کردن فرایند ریزمقیاس‌سازی استفاده کردند (۱۹). کری و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش کریجینگ ناحیه به نقطه<sup>۴</sup>، داده‌های کربن آلی مربوط به واحدهای نقشه خاک را ریزمقیاس نمودند (۱۴).

تایلور و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش آماری رگرسیون چندمتغیره و داده‌های کمکی اجزاء پوشش اراضی، داده‌های تبخیر تعرق حاصل از تجزیه تحلیل تصاویر ماهواره آستر با قدرت تفکیک ۹۰ متر به قدرت تفکیک ۱۵ متر ریزمقیاس نمودند (۳۰).

همان‌طور که ذکر گردید در مبحث ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی خاک، انتقال اطلاعات از اندازه پیکسل درشت به اندازه پیکسل ریز صورت می‌گیرد. ریزمقیاس‌سازی به روش مستقیم<sup>۵</sup> یک راه برای پیش‌بینی مقدار متغیر هدف در اندازه پیکسل ریز با استفاده از مقدار آن در اندازه پیکسل درشت است که توسط پژوهشگران مختلف برای پیش‌بینی توزیع شماری از گونه‌های پرنده در قدرت تفکیک مکانی ریز بر اساس توزیع آن‌ها در قدرت تفکیک مکانی درشت به‌کار رفته است (۱، ۳، ۲۲). بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر این بود که با استفاده از روش مستقیم و مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و درختان رگرسیون و متغیرهای کمکی، امکان ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی ویژگی‌های مدیریتی و پایدار خاک (درصد اجزا بافت خاک، درصد کربنات کلسیم معادل، کربن آلی و درصد سنگریزه خاک سطحی) از اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر (حاصل از کریجینگ بلوکی) به اندازه پیکسل ۱۰ متری، مورد بررسی قرار بگیرد. اندازه پیکسل‌های اولیه مذکور مقیاس‌های مرسوم تهیه نقشه خاک و اندازه پیکسل نهایی ۱۰ متر، اندازه کرت‌های آزمایشی را پوشش می‌دهد.

نقشه‌برداری رقومی خاک، مقیاس نقشه بهتر است با اصطلاحاتی مانند قدرت تفکیک مکانی یا اندازه پیکسل بیان شود (۱۹). به این دلیل، ریزمقیاس‌سازی را می‌توان به‌عنوان فرایند انتقال اطلاعات از یک مقیاس یا اندازه پیکسل درشت‌تر به مقیاس یا اندازه پیکسل ریزتر توسط توابع تجربی یا مکانیستی تعریف نمود (۵). واژه نزول مقیاسی، کوچک‌مقیاس‌سازی و ریزمقیاس‌سازی را نیز می‌توان معادل واژه ریزمقیاس‌سازی به‌کار بست.

طی دو دهه اخیر در علوم خاک به مفهوم ریزمقیاس‌سازی و پتانسیل کاربرد آن پرداخته شده است. برای مثال فینکه و همکاران (۱۹۹۸) مفاهیم آن را با ذکر مثال‌هایی در علوم خاک و آب به تفصیل شرح دادند (۸). همچنین، مک‌برتنی (۱۹۹۸) دو روش توابع انتقالی و اسپلین‌های پیکنوفیلاتیک<sup>۱</sup> را برای ریزمقیاس‌سازی اطلاعات خاک پیشنهاد نمود (۲۱). در زیر به برخی کارهای انجام شده در زمینه ریزمقیاس‌سازی داده‌های خاک و آب اشاره شده است:

مرلین و همکاران (۲۰۰۸) به‌منظور ایجاد ورودی‌های سازگار با مدل‌سازی اقلیمی، اطلاعات رطوبتی خاک حاصل از بازیابی سیستم رادیومتری امواج میکرو غیرفعال با قدرت تفکیک مکانی درشت را به اطلاعات با قدرت تفکیک ریزتر تبدیل نمودند (۲۳). پاتئو و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های دمای شب تصاویر مودیس و داده‌های توپوگرافی و روش آماری رگرسیون چندمتغیره و درختان رگرسیون نقشه وقوع یخبندان را از قدرت تفکیک ۱۰۰۰ متر به ۱۰۰ متر ریزمقیاس نمودند (۲۵).

ملانو و همکاران (۲۰۱۲) یک نرم‌افزار به اسم دسیور<sup>۲</sup> برای استفاده در محیط R تهیه نمودند. آن‌ها در این نرم‌افزار از مدل‌های جمع‌پذیر تعمیم‌یافته وزن‌دار<sup>۳</sup> برای ایجاد ارتباط بین متغیر هدف و

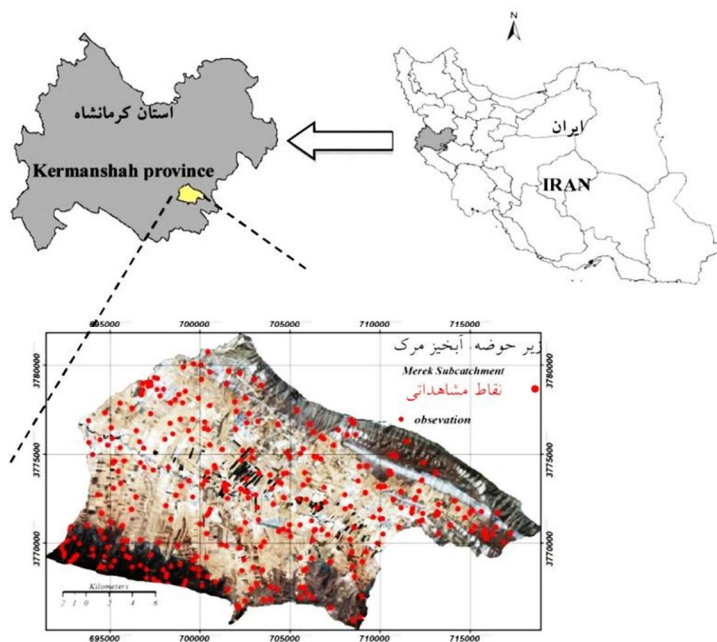
4- Area to point kriging  
5- Direct approach

1- Pycnophylactic splines  
2- Dissever  
3- Weighted generalized additive models

## مواد و روش‌ها

**موقعیت و مشخصات عمومی ناحیه مورد مطالعه:** اراضی مورد مطالعه با وسعتی حدود ۲۴۰۰۰ هکتار در بیست کیلومتری جنوب شرقی شهر کرمانشاه و در بین مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و صفر دقیقه تا ۳۴ درجه و ۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). بر اساس داده‌های طولانی‌مدت هواشناسی، متوسط درجه حرارت سالیانه هوا ۱۳/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالیانه ۴۸۱/۴ میلی‌متر است. سنگ آهک، دولومیت، مارن، سنگ رس و ماسه سنگ، سنگ‌های اصلی سازندهای زمین‌شناسی در محدوده مطالعاتی هستند. اراضی دیم، اراضی آبی، مرتع، جنگل، مخلوط جنگل و مرتع و مخلوط مرتع و رخنمون سنگی مهم‌ترین کاربری‌های ناحیه مورد مطالعه می‌باشند. انستیتی سولز ۷۶ درصد، انتی سولز ۷/۴ و ورتی سولز ۵/۴ درصد خاک‌های منطقه را تشکیل می‌دهند. کمپلکس انتی سولز و رخنمون سنگی ۱۱/۲٪ اراضی را در بر می‌گیرد (۷).

**جمع‌آوری داده‌های خاک:** از داده‌های میراثی خاک به‌منظور اجرای پژوهش حاضر استفاده گردید. این داده‌ها در برگیرنده اطلاعات ۳۸۲ نمونه خاک است که طی سال ۱۳۸۵ از افق سطحی خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) توسط پژوهشگران مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه در سطح ۲۴۰۰۰ هکتار اراضی مذکور جمع‌آوری شده است. با بررسی آماری اولیه و کنترل کیفیت داده‌ها، نمونه‌های ناقص و داده‌های پرت حذف گردید و ۳۲۰ نمونه خاک (به‌طور تصادفی ۲۴۰ نمونه برای واسنجی مدل و ۸۰ نمونه برای اعتبارسنجی مدل) برای مراحل بعدی پروژه انتخاب شد (شکل ۱). اجزاء بافت خاک، کربن آلی، درصد کربنات‌های خاک و درصد حجمی سنگریزه و قلوه‌سنگ (یعنی مهم‌ترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل در منطقه)، برای اجرای مراحل ریزمقیاس‌سازی و تهیه نقشه‌گزینش شدند.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان کرمانشاه و محل نقاط مشاهداتی.

Figure 1. The region under study in Iran and the province of Kermanshah and location of observation points.

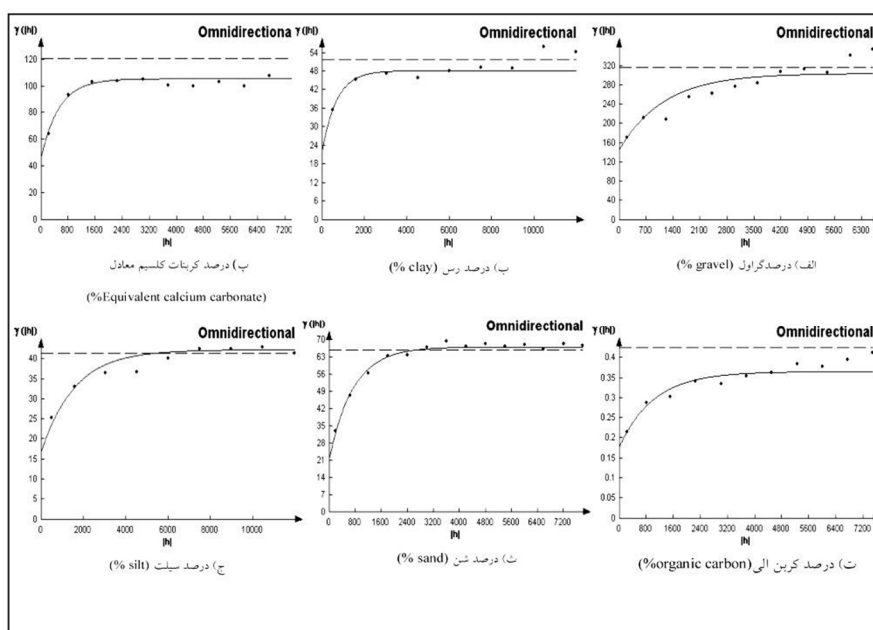
۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر با استفاده از بسته gstat در محیط نرم‌افزار R تهیه شد. هدف از تهیه نقشه‌های موردنظر، تبدیل ۳۲۰ نمونه گسسته با ساپورت نقطه‌ای به رویه‌ای پیوسته با ساپورت بلوکی در اندازه‌های مختلف برای اجرای عملیات ریزمقیاس‌سازی و اعتبارسنجی آن بود.

تهیه نقشه‌های کریجینگ بلوکی ویژگی‌های خاک: ابتدا ساختار مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از مدل‌های مناسب نیم تغییرنا براساس ۳۲۰ نمونه با توزیع تصادفی نامنظم تعیین گردید (جدول ۱، شکل ۲) و سپس نقشه کریجینگ بلوکی ویژگی‌های مورد نظر در اندازه پیکسل

جدول ۱- پارامترهای مدل تغییرنا برای شش ویژگی خاک سطحی.

Table 1. The semi-variogram model parameters for six soil surface properties.

مدل نیم‌تغییرنا Semi-Variogram model	آستانه جزئی (آستانه کل- اثر قطعه‌ای) Partial sill (total sill-nugget)	دامنه (متر) Range(m)	اثر قطعه‌ای Nugget effect	حداقل فاصله جفت نقاط (متر) Minimum distance of point-pairs(m)	گام (متر) Lag (m)	متغیر variables
نمایی (exponential)	45.63	2206.4	21.55	28.8	600	شن (%) Sand (%)
نمایی (exponential)	25.68	4734	16.79	28.8	1500	سیلت (%) Silt (%)
نمایی (exponential)	26	2040	22.36	28.8	1500	رس (%) Clay (%)
نمایی (exponential)	0.188	3039	0.179	28.8	750	کربن آلی (%) Organic carbon (%)
نمایی (exponential)	59.24	1605.5	46.8	28.8	750	کربنات کلسیم معادل (%) Equivalent calcium carbonate (%)
نمایی (exponential)	158.29	3463.9	146.86	28.8	600	سنگریزه (%) Gravel (%)



شکل ۲- نیم تغییرنمای شش ویژگی خاک سطحی.

Figure 2. Semi-variogram of six soil surface properties.

هستند و بر توزیع و مقدار متغیرهای مورد مطالعه تأثیر دارند؛ پس از رقومی‌سازی، در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه زمین‌شناسی موجود برای محدوده مورد مطالعه، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت کرمانشاه بود که بعد از ژئورفرنس کردن، نقشه چهارگوش آن در محیط نرم‌افزار ایلویس تهیه گردید. لازم به ذکر است متغیرهای کیفی مانند نقشه زمین‌شناسی را می‌توان با هر مقیاس کارتوگرافی (کوچک تا بزرگ) به اندازه پیکسل مورد نظر (ریز تا درشت) رستری نمود و وارد فرایند مدل‌سازی کرد. در هر صورت این نقشه‌ها دارای اطلاعات هستند با این تفاوت که نقشه‌های بزرگ مقیاس دارای اطلاعات بیش‌تری است و می‌تواند به افزایش کارایی مدل‌سازی کمک نماید (۲۷). نقشه کاربری اراضی بر اساس روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال و با استفاده از تصاویر ماهواره لندست تهیه گردید. برای تهیه نقشه ژئومورفولوژی از روش زینک (۱۹۸۹) استفاده شد (۳۳). بر اساس علم ژئومورفولوژی و تفسیر عکس‌های هوایی، زمین‌نما به زمین‌ریخت‌های همگن تجزیه و نقشه‌های ژئومورفولوژی تهیه می‌گردد. انتظار می‌رود در هر زمین ریخت، نوع و ویژگی‌های خاک مشابه باشند. به‌منظور رستری کردن نقشه‌ها به اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متری؛ واحدهای نقشه با وسعت کم‌تر از حداقل مساحت قابل تفکیک<sup>۵</sup> بر اساس مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰۰، ۱:۱۰۰۰۰۰، ۱:۲۵۰۰۰۰ در واحدهای نقشه بزرگ‌تر ادغام گردید (جدول ۳).

تهیه مشتقات مرتبه اول و دوم مدل رقومی ارتفاع: در این پژوهش، با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع دارای قدرت تفکیک (اندازه پیکسل) ۱۰ متر، مشتقات مختلف مراتب اول و دوم با استفاده از نرم‌افزار آرک-جی‌آی‌اس نسخه ۱۰ (Arc-GIS10)، ایلویس نسخه ۳/۸ (ILWIS3.8) و ساگا نسخه ۲/۲ (SAGA) تهیه گردید (جدول ۲).

**داده‌های سنجش از دور:** با استفاده از تصاویر چندطیفی ماهواره‌ای لندست ETM+ مربوط به بهار ۱۳۸۵، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده<sup>۱</sup> یا به عبارتی نسبت اختلاف باند ۴ و ۳ به جمع این دو باند (۲۶) و شاخص رس<sup>۲</sup> (۳۱) که به صورت نسبت باند ۵ به باند ۷ بیان می‌شود؛ نیز تهیه گردید. علاوه بر این، شاخص اندازه ذرات<sup>۳</sup> نیز که از رابطه زیر به دست می‌آید به عنوان یک متغیر کمکی در عملیات مدل‌سازی به کار رفت. این شاخص نشان‌دهنده درشت بودن اندازه ذرات در خاک سطحی است و با اندازه شن ریز همبستگی نشان می‌دهد (۳۲).

$$GSI = \frac{\text{band3} - \text{band1}}{\text{band1} + \text{band2} + \text{band3}} \quad (1)$$

لازم به توضیح است تمام لایه‌های اطلاعاتی کمکی در اندازه پیکسل ۱۰ متری تهیه شدند. سپس با دستور انبوه‌سازی<sup>۴</sup> و فیلتر میانگین در محیط نرم‌افزار الویس به نقشه‌های با اندازه پیکسل‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متری تبدیل شدند.

**تهیه نقشه‌های موضوعی:** نقشه‌های موضوعی (کیفی) ناحیه مورد مطالعه شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و کاربری اراضی که به ترتیب معرف مواد مادری، شکل اراضی و مدیریت انسان بر اراضی

- 1- Normalized Difference Vegetation Index
- 2- Clay index
- 3- Grain Size Index
- 4- Aggregation

5- Minimum legible area (MLA)

جدول ۲ - متغیرهای کمکی مورد استفاده برای ریزنقیاس‌سازی.

Table 2. Quantitative covariates used to downscaling.

خلاصه آماری متغیرهای کمکی در اندازه پیکسل ۱۰ متر		حد اقل		حد اکثر		میانگین		شرح مختصر	قدرت تفکیک مکانی	متغیر کمکی
Summary statistics of covariates with 10 m grid-cell		minimum	maximum	minimum	maximum	mean	mid-range			
1658799	204978	362406	0	0.0004	10.28	33.6	0.6782	جمع تابش مستقیم و پخشیده خورشیدی در هر محل (وات ساعت بر مترمربع)	10	تابش کل (Area Solar Radiation)
3.8080	6.2832	0.0004	0	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Sum of direction and diffuse solar radiation for each location (WH/m <sup>2</sup> ) درجه شیب در جهت عقربه‌های ساعت نسبت به شمال (ارایان)	10	جهت شیب (Aspect)
19.24	33.6	10.28	0	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Direction of the steepest slope gradient from the North نسبت باند ۵ به باند ۷	30	شاخص رس (Clay Index)
0.3004	0.6782	0	0	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Landsat band ratio 5/7 تحدب سطح اراضی	10	تحدب (Convexity)
1.682	2.792	1.470	1.470	0.0004	10.28	33.6	0.6782	convexity of the land surface ارتفاع (متر) سطح اراضی نسبت به سطح دریا	10	ارتفاع (Elevation)
410038	476114	88106	476114	0.0004	10.28	33.6	0.6782	elevation of the sea surface (m) تابش پخشیده خورشیدی در هر محل (وات ساعت بر مترمربع)	10	تابش پخشیده (Diffuse Radiation)
4061.1	4366.2	454.44	4366.2	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Diffuse incoming solar radiation for each location (WH/m <sup>2</sup> ) مدت تابش (ساعت)	10	مدت تابش مستقیم (Direct Duration)
1248762	1587391	205019	1587391	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Duration of direct incoming solar radiation (hour) تابش مستقیم خورشیدی در هر محل (وات ساعت بر مترمربع)	10	تابش مستقیم (Direct Radiation)
1449.1	6320075	100	6320075	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Direct incoming solar radiation for each location (WH/m <sup>2</sup> ) تعداد پیکسل‌ها در شیب بالایی	10	تجمع جریان (Flow Accumulation)
8	14	6	14	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Number of upslope cells نسبت تفاوت باند ۳ و ۱ به مجموع باند ۱، ۲ و ۳	30	شاخص اندازه ذرات (Grain Size Index)
9.63	14.93	6.32	14.93	0.0004	10.28	33.6	0.6782	band3-band1 band1+band2+band3 نشان‌دهنده میانگین انحنای	10	انحنای میانگین (Meane)
0.0012	4.17	-4.24	4.17	0.0004	10.28	33.6	0.6782	Mean of cruvature نشان‌دهنده نواحی رسوبگذاری	10	شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (MRVBF)
								Identifies the depositional areas		

ادامه جدول ۲ -  
Continue Table 2.

خلاصه آماری متغیرهای کمکی در اندازه پیکسل ۱۰ متر Summary statistics of covariates with 10 m grid-cell		شرح مختصر Brief description (unit)		قدرت تفکیک مکانی Spatial resolution	متغیر کمکی Auxiliary variables
میانگین mean	حداکثر maximum	حداقل minimum			
1.54	5.95	0	نسبت تفاوت باند ۴ و ۳ به مجموع این دو باند band4+band3 band4-band3	30	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)
10.33	17.08	5.31	حداکثر میزان تغییر ارتفاع بین پیکسل‌ها و پیکسل‌ها مجاور (رادیان) Maximum rate of change between the cells and neighbors (radian)	10	شیب (Slope)
0.13	1.24	0	تغییر شیب به سمت پایین خط جریان	10	انحنای نیبرخی (Profile Curvature)
0.07	50	-49.75	The rate of change of the vertical curvature (m-l)	10	انحنای صفحه‌ای (Plan Curvature)
0.001	5.03	-4.05	The rate of change of the horizontal curvature (m-l) حداکثر انحنای Maximum curvature	10	انحنای حداکثر (Maximum Curvature)
0.005	0.5	-0.6	دربزرگ‌ناده مناطق گرم‌تر شیب covers the warmer zones of slopes	10	موقعیت شیب میانی (Midslope Position)
0.41	0.9986	0	حداقل انحنای Minimum curvature	10	انحنای حداقل (Min Curvature)
-0.005	0.297	-0.6	نشان‌دهنده اثر توپوگرافی را بر فرسایش accounts for the effect of topography on erosion	10	شاخص رسوب (Sediment Index)
32.58	29243	0.015	حاصلضرب تاثرات شیب در ناحیه ویژه آبخیز catchment area multiplied by slope	10	شاخص قدرت جریان (Stream Power Index)
2823	17935350	0	حاصل ضرب شیب در انحنای صفحه‌ای Plan curvature multiplied by slope	10	انحنای مماسی (Tangentail Curvature)
0.00088	0.23	-0.41	معیار کنترل توپوگرافی بر وضعیت رطوبتی خاک Calculates slope gradient and specific catchment area based Topographic wetness index	10	شاخص خبسی توپوگرافی (Topographic Wetness Index)
8.426	24.4	0.54	موقعیت نسبی دره relative position of the valley	10	عمق دره (Valley Depth)
14.56	177.9	0	بیانگر فاصله عمودی تا شبکه آبراهه‌ها برای هر پیکسل calculates Vertical distance to channel network for each cell	10	فاصله عمودی تا شبکه آبراهه (Vertical Distance To Channel Network)



جدول ۳- متغیرهای کمکی کیفی مورد استفاده برای ریزمقیاس سازی.

Table 3. Qualitative covariates used to downscaling.

تعداد کلاس‌ها در هر نقشه رستری*			شرح مختصر Brief description	مقیاس یا اندازه پیکسل اولیه Scale/Resolution	متغیر Variables
250	100	50			
8	10	10	نقشه زمین‌شناسی اسکن و زمین مرجع شده Scanned and registered geological map	1:100000	نقشه زمین‌شناسی Geology map
15	20	20	انواع زمین‌ریخت Landform types	1:25000	نقشه ژئومورفولوژی Geomorphology map
5	6	6	نوع استفاده از اراضی Land use type	30(m)	نقشه کاربری اراضی Landuse map
8	8	8	جهت‌های جریان براساس ۸ کلاس جهت شیب Flow direction based on 8 class of aspect	10(m)	نقشه جهت جریان Flow direction map

\* برای تبدیل مقیاس کارتوگرافی به اندازه پیکسل و بالعکس، فرض می‌شود کوچک‌ترین مساحت قابل تشخیص یک میلی‌متر در یک میلی‌متر باشد. اگر کوچک‌ترین مساحت قابل تشخیص (قدرت تفکیک مکانی) بر روی نقشه را معادل  $\lambda$  (۰/۰۰۱ متر) و  $\frac{1}{\chi}$  عدد مقیاس باشد. برای مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ اندازه پیکسل ۱۰۰ متر محاسبه می‌شود (۱۵):

$$p = \frac{1}{\chi} * \lambda = 100000 * 0.001 = 100 \text{ m}$$

\* For convert cartographic scale to pixel size, it is assumed that the smallest area discernible is 1 mm by 1 mm. If we consider the smallest area resolvable on a map  $\lambda$  and scale number  $\frac{1}{\chi}$ , the pixel size (p) of 1:100,000 conventional maps can be calculated as (15):

$$p = \frac{1}{\chi} * \lambda = 100000 * 0.001 = 100 \text{ m}$$

بر اساس مطالعه آن‌ها انواع ریزمقیاس سازی در سه دسته قرار می‌گیرند:

۱- شبکه بندی ریز: این وضعیت زمانی است که اندازه پیکسل تغییر می‌کند اما ساپورت بدون تغییر باقی می‌ماند (مانند حالت تصویر ۳ ← تصویر ۱ در شکل ۴). این روش ریزمقیاس سازی همان عملیاتی است که در کریجینگ معمولی انجام می‌شود. یعنی مقادیر متغیر در نقاط نمونه برداری نشده (قدرت تفکیک مکانی ریز) از نقاط مشاهداتی (قدرت تفکیک مکانی درشت) پیش‌بینی می‌گردد.

ریزمقیاس سازی: ملانو و همکاران (۲۰۱۳) براساس سه ماهیت مقیاس - مکانی<sup>۱</sup> شامل گستره<sup>۲</sup>، قدرت تفکیک مکانی<sup>۳</sup> و ساپورت<sup>۴</sup> روش‌های ریزمقیاس سازی نقشه‌های رقومی خاک را به تفصیل شرح داده‌اند (۲۰). گستره نقشه، بیانگر وسعت ناحیه مورد مطالعه و قدرت تفکیک مکانی معرف اندازه پیکسل نقشه رستری است. مفهوم ساپورت به حجم یا مساحت ارتباط دارد. ساپورت در نقشه برداری رقومی خاک به صورت نقطه‌ای (نقاطی بدون حجم یا مساحت) یا بلوکی (با حجم یا مساحت قابل اندازه‌گیری) تعریف می‌شود (شکل ۳).

- 1- Spatial-scale
- 2- Extent
- 3- Resolution
- 4- Support

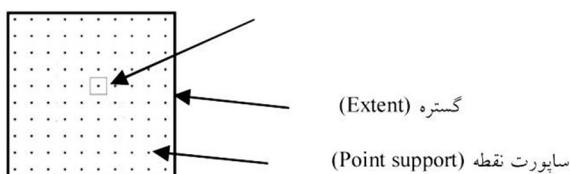
5- Fine gridding

۳- کاهش اندازه پیکسل (ساپورت)<sup>۲</sup>: در این شیوه ریزمقیاس‌سازی، ساپورت و اندازه پیکسل هر دو معادل هم بوده و به‌طور هم‌زمان و به یک اندازه تغییر می‌کنند. در واقع در این شیوه انتقال اطلاعات از ساپورت بلوکی درشت به ساپورت بلوکی ریز انجام می‌شود. فرایند کاهش ساپورت براین فرض استوار است مقدار متغیر هدف در هر پیکسل درشت، برابر با میانگین مقادیر متغیر هدف در پیکسل‌های ریزی است که توسط پیکسل درشت در بر گرفته شده است (مثال تصویر ۴ ← تصویر ۲ در شکل ۴).

۲- پیچیدگی زدائی<sup>۱</sup>: این شیوه ریزمقیاس‌سازی، هنگامی صورت می‌گیرد که ساپورت و اندازه پیکسل هر دو معادل هم بوده و به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کنند اما تغییرات آن‌ها یکسان نیست. فرایند پیچیدگی زدائی همیشه کاهش در ساپورت (از بلوکی به نقطه‌ای) را نشان می‌دهد (شکل ۴). این فرایند در مثال‌های زیر نشان داده شده است.

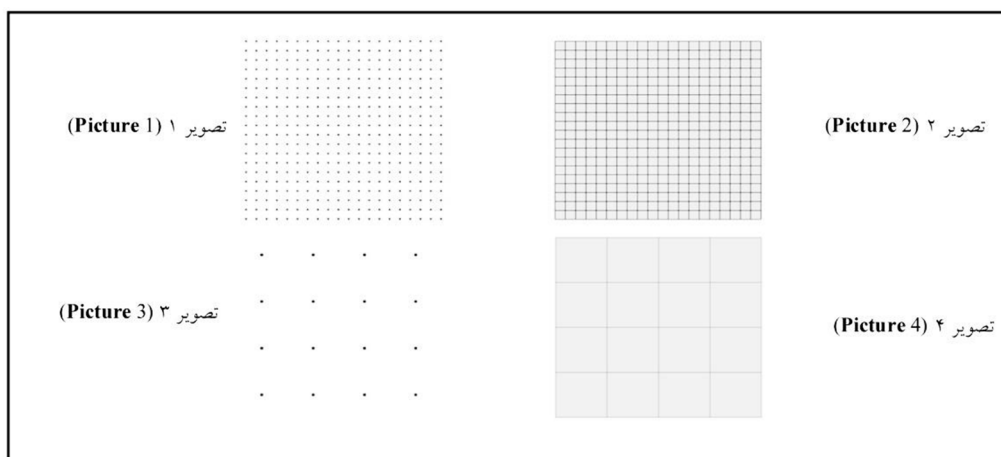
تصویر ۲ ← تصویر ۳, تصویر ۲ ← تصویر ۱  
تصویر ۴ ← تصویر ۳, تصویر ۴ ← تصویر ۱

ساپورت بلوکی که معادل اندازه پیکسل یا فواصل شبکه است (Block support equal with pixel size)



شکل ۳- مفاهیم گستره، اندازه پیکسل، ساپورت بلوکی و نقطه‌ای.

Figure 3. Concepts of extent, pixel size, point and block support.



شکل ۴- الگوی کلی نقشه‌های خاک: تصویر ۱ و تصویر ۲ دارای فاصله شبکه (اندازه پیکسل) یکسانی هستند. با وجود این تصویر ۲ دارای ساپورت بلوکی می‌باشد (اندازه بلوک معادل با اندازه پیکسل است) و تصویر ۱ دارای ساپورت نقطه‌ای است. به‌طور مشابه در تصویر ۳ و تصویر ۴، فاصله شبکه بزرگ‌تر است (۲۰).

Figure 4. Soil maps pattern. Picture 1 and picture 2 have the same Pixel size but picture 2 is on block support (where block size is equal to the grid cell), picture 1 is on point support. In the same way picture 3 and picture 4 apart from the grid cell is larger (20).

1- Disseveration  
2- Deconvolution

یا کشف قواعد لازم برای فرایند ریزمقیاس‌سازی استفاده گردید.

**مدل‌های خطی تعمیم‌یافته:** هنگامی که فرضیات اصلی مدل‌های خطی کلاسیک مانند ثابت بودن واریانس و متغیر پاسخ<sup>۳</sup> برقرار نیست و متغیر پاسخ علاوه بر توزیع نرمال دارای توزیع پواسن، دوجمله‌ای، گاما و... باشد از مدل‌های خطی تعمیم استفاده می‌شود. رابطه بین متغیر پاسخ و متغیر(های) توضیحی<sup>۴</sup>، توسط یک سری توابع ربطی<sup>۵</sup> (مانند تابع یکنواخت، لگاریتمی، معکوس و...) تعیین می‌گردد (۱۰). در این مطالعه، برای اجرای این مدل‌ها از نرم‌افزار R و بسته نرم‌افزاری stats، تابع glm، توزیع نرمال و تابع ربطی یکنواخت استفاده شد.

**درختان رگرسیون:** برای اولین بار این روش توسط بریمن و همکاران (۱۹۸۴) توسعه یافت (۶). برتری درختان رگرسیون بر مدل‌های خطی، توانایی آن در مواجهه شدن با رفتار غیرخطی متغیرها و عدم نیاز به فرضیات مدل‌های خطی کلاسیک می‌باشد. درخت بر اساس یک سری قواعد منتج از رابطه بین مجموعه داده‌ها تشکیل می‌شود و هر شاخه آن به یک گره نهایی ختم می‌شود. یک گره نهایی، مقدار پیش‌بینی شده متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. اگر گره نهایی به یک عدد حقیقی ختم شود به آن درخت رگرسیون گفته می‌شود. در این پژوهش، برای اجرای مدل درختان رگرسیون از بسته نرم‌افزاری rpart در محیط R استفاده شد. در این نرم‌افزار اجازه داده می‌شود که درخت به اندازه کافی رشد کند و در نهایت هرس کردن درخت بر اساس پارامتر پیچیدگی<sup>۶</sup> (پارامتری برای جلوگیری از بیش برآش مدل در این نرم‌افزار) انجام می‌شود.

یک شیوه ریزمقیاس‌سازی از نوع کاهش اندازه پیکسل (ساپورت)، روش مستقیم است (۱، ۳). این روش بر دو فرض استوار است. فرض اول که برای ریزمقیاس‌سازی بسیار مهم و کلیدی است بیان می‌کند میانگین مقدار متغیر هدف در اندازه پیکسل ریز برابر با مقدار عددی آن متغیر در پیکسل درشتی است که پیکسل‌های ریز در درون آن جای می‌گیرند. فرض دوم عبارت از این است هنگامی که در مرحله ایجاد ارتباط بین متغیر هدف در اندازه پیکسل درشت و متغیرهای کمکی با همان اندازه پیکسل با استفاده از روش‌های آماری و داده‌کاوی، پارامترهای مدل به دست می‌آید. این پارامترها برای پیش‌بینی متغیر هدف در اندازه پیکسل ریز با استفاده از متغیرهای کمکی با اندازه پیکسل ریز نیز معتبر هستند.

در این مطالعه از رویکرد ریزمقیاس‌سازی مستقیم استفاده گردید. در این روش از طریق مدل‌های آماری و روش‌های داده‌کاوی به سادگی رابطه بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی با اندازه پیکسل درشت شناسایی می‌شود و از پارامترهای واسنجی مدل در این فرایند مدل‌سازی و ویژگی‌های محیطی با اندازه پیکسل ریز برای پیش‌بینی متغیر هدف در اندازه پیکسل ریز استفاده می‌شود. ابتدا ویژگی‌های محیطی در اندازه پیکسل ریز با هم ترکیب می‌شوند تا میانگین آن‌ها در سطح پیکسل درشت به دست آید. متغیرهای هدف که دارای ساپورت نقطه‌ای بودند با کریجینگ بلوکی به ساپورت بلوکی (با اندازه پیکسل درشت) تبدیل گردید تا بتوان آن را در فرایند مدل‌سازی با متغیرهای کمکی با همان اندازه پیکسل درشت به کار برد. به همین منظور گستره‌ای از نقشه‌ها با اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر تهیه شد تا فرایند ریزمقیاس نمودن در سلسله مراتبی از مقیاس‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش از روش‌های مدل خطی تعمیم‌یافته<sup>۱</sup> و درختان رگرسیون<sup>۲</sup> برای استخراج

- 2- Regression Trees
- 3- Response variable
- 4- Explanatory variables
- 5- Link function
- 6- Complexity parameter

- 1- Generalized linear models

که در آن،  $Z(\bar{X})$  و  $Z^*(\bar{X})$  به ترتیب نشان‌دهنده میانگین داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی هستند. البته در این پژوهش از ضریب تبیین تعدیل‌شده<sup>۳</sup> استفاده شد. این ضریب به دلیل به حساب آوردن درجه آزادی تعداد نمونه‌ها بر ضریب تبیین برتری دارد. ضریب همبستگی تطابق لاین<sup>۴</sup> معیاری است که برای ارزیابی صحت و دقت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده استفاده می‌شود (۱۶).

$$r_c = \frac{2S_{xy}}{s_x^2 + s_y^2 + (\bar{y} - \bar{x})^2} \quad (4)$$

که در آن،  $S_{xy}$  ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده‌شده  $(X)$  و پیش‌بینی‌شده  $(y)$ ،  $S_y^2$  واریانس پیش‌بینی،  $S_x^2$  واریانس مشاهدات،  $\bar{y}$  میانگین پیش‌بینی،  $\bar{x}$  میانگین مشاهدات و  $r_c$  ضریب همبستگی تطابق لاین می‌باشد. این معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$r_c = r * c_b \quad (5)$$

$$c_b = \frac{2}{\frac{s_y + s_x + (\bar{y} - \bar{x})}{s_x \cdot s_y \cdot s_x \cdot s_y}} \quad (6)$$

که در آن‌ها،  $r$  ضریب همبستگی پیرسن و  $c_b$  شاخص اختلاف بین بهترین خط برازش یافته  $y = \beta_0 + \beta_1 * x$  و خط تطابق کامل  $y = x$  است. اگر  $r_c = 1$  یعنی مدل هم دقیق است ( $r = 1$ ) و هم صحت دارد ( $c_b = 1$ ). بنابراین این معیار از ضریب تبیین مفیدتر است. هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده صحت و دقت بیش‌تر مدل است (۱۶).

### نتایج و بحث

انتخاب متغیرهای کمکی: ۲۹ متغیر کمکی در قالب نقشه‌های رستری شامل ۲۳ متغیر حاصل از مشتقات مدل رقومی ارتفاع، سه شاخص رس، اندازه ذرات و

ارزیابی صحت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده ویژگی‌های خاک در مقیاس ریز: در این پژوهش از روش اعتبارسنجی دوجانبه کا مرتبه<sup>۱</sup> استفاده شد. بدین منظور ۳۲۰ داده حاصل از تبدیل ساپورت نقطه‌ای به ساپورت بلوکی از نقشه‌های کریجینگ بلوکی با اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر استخراج و به‌طور تصادفی به ۴ دسته با اندازه نمونه یکسان ۸۰ تایی تقسیم شد که در هر بار اجرای مدل یک دسته ۸۰ نمونه‌ای از داده‌ها کنار گذاشته شده و برای محاسبه خطای مدل از آن‌ها استفاده شد. خطای نهایی مدل، از میانگین خطاهای حاصل از ۴ بار اجرای مدل به دست می‌آید. خطای مدل، تفاوت بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی‌شده می‌باشد. هرچه این اختلاف کم‌تر باشد نشان‌دهنده صحت بالای مدل مورد نظر می‌باشد.

خطای مدل را به شکل‌های مختلفی می‌توان نشان داد که مرسوم‌ترین آن‌ها ریشه میانگین مربعات خطای<sup>۲</sup> است که صحت و دقت پیش‌بینی را نشان می‌دهد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_{x_i}^* - z_{x_i}]^2}{n}} \quad (2)$$

که در آن،  $RMSE$  ریشه میانگین مربعات خطای تخمین،  $Z_{x_i}^*$  متغیر پیش‌بینی‌شده،  $Z_{x_i}$  متغیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد نمونه می‌باشد. یک مدل خوب، دارای حداقل مقدار ریشه میانگین مربعات خطای تخمین است (۱۰).

معیار دیگر برای تخمین دقت مدل، ضریب تبیین ( $R^2$ ) بود که کارایی مدل در پیش‌بینی متغیر هدف با استفاده از متغیرهای کمکی را نشان می‌دهد.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z^*(\bar{x})]^2}{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(\bar{x})]^2} \quad (3)$$

3- Adjusted R2

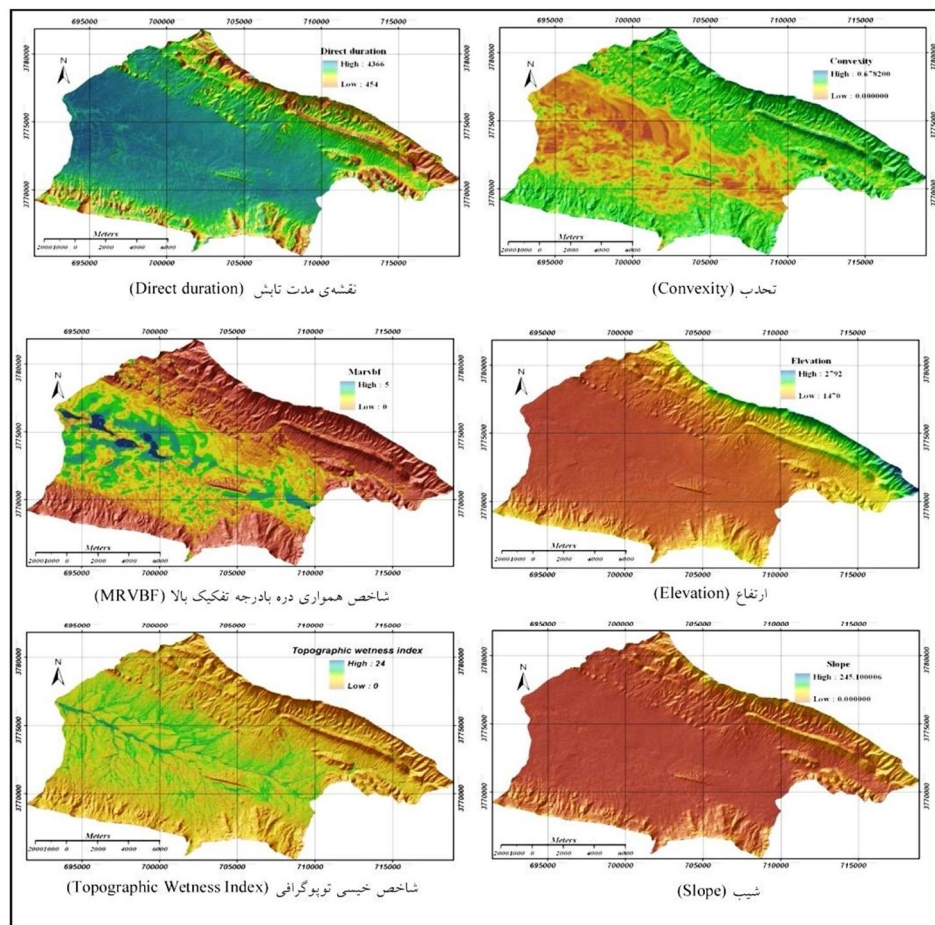
4- Lin's concordance correlation coefficient

1- K-fold cross-validation

2- Root Mean Squared Error

قدرمطلق ضریب همبستگی بین متغیرهای کمکی با درصد شن (۰/۳-۰)، رس (۰/۴-۰)، سیلت (۰/۵-۰)، کربنات کلسیم معادل (۰/۶-۰)، کربن آلی (۰/۷-۰/۲) و سنگریزه (۰/۸-۰/۲) است. مقدار شن کمترین و مقدار سنگریزه بالاترین همبستگی با متغیرهای کمکی داشتند. با در نظر گرفتن همه پیکسل‌ها، بیشترین همبستگی بین ویژگی‌های خاک و ارتفاع، مدت تابش، تحدب، شیب، شاخص خیسی توپوگرافی و شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا مشاهده شد (شکل ۵). به نظر می‌رسد عدم معنادار شدن ضریب همبستگی پیرسن بین متغیرها و شاخص رس استفاده از تصاویر فصل بهار به دلیل حداکثر پوشش گیاهی باشد. در ضمن هر چهار متغیر کیفی مذکور در فرایند ریزمقیاس‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

پوشش گیاهی نرمال شده و سه متغیر کیفی شامل نقشه زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و کاربری اراضی تهیه گردید. متغیر کمکی جهت جریان از مشتقات مدل رقومی ارتفاع است که جهت جریان آب را بر حسب هشت جهت اصلی و فرعی جغرافیایی نشان می‌دهد نیز به‌عنوان متغیر کیفی در نظر گرفته شد. به‌منظور انتخاب متغیرهای کمکی تأثیرگذار بر متغیر هدف، از ضریب همبستگی استفاده شد. بدین صورت که متغیرهای کمکی که در سطح ۰/۰۱ با ویژگی‌های مورد مطالعه خاک معنی‌دار بودند انتخاب گردیدند (به‌دلیل حجم زیاد داده‌ها، جداول همبستگی ارائه نشده است). با تعیین ضریب همبستگی بین متغیرهای کمکی و متغیرهای مورد پیش‌بینی شن، سیلت، رس، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل و سنگریزه مشخص شد که دامنه



شکل ۵- نقشه‌های متغیرهای کمکی که بیشترین همبستگی با ویژگی‌های مهم خاک داشتند.

Figure 5. Maps of covariates that were most correlated with important soil properties.

ضریب همبستگی تطابق به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۷۱ است که مربوط به اندازه پیکسل ۵۰ متری می‌باشد. همچنین کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای تخمین محاسبه شده ۴/۴۷٪ بود که به اندازه پیکسل ۲۵۰ متری مربوط می‌شود. در مورد سنگریزه هم بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۷) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۸۳) برای اندازه پیکسل ۵۰ متر برآورد شد. همچنین ریزمقیاس‌سازی همین اندازه پیکسل کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۵/۵۷٪) را نشان می‌دهد.

**نتایج ارزیابی استفاده از درختان رگرسیون:** نتایج ارزیابی ریزمقیاس‌سازی متغیر شن با استفاده از درختان رگرسیون بیانگر بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده و ضریب همبستگی تطابق به مقدار ۰/۱۴ و ۰/۳۶ در ارتباط با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر می‌باشد (جدول ۴). برای همین متغیر، ریزمقیاس‌سازی اندازه پیکسل ۲۵۰ کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۳/۹٪) را نشان داد. نتایج ارزیابی درختان رگرسیون در مورد سیلت بیانگر برآورد بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده و ضریب همبستگی تطابق به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۵۶ برای اندازه پیکسل ۵۰ متر است و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۲/۳۱٪) برای همین اندازه پیکسل است. نتایج ریزمقیاس‌سازی رس نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۲۱) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۴۳) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۳٪) برای اندازه پیکسل ۲۵۰ متر به دست آمده است. فرایند ریزمقیاس‌سازی با درختان رگرسیون در مورد کربن آلی بیانگر این است که بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۵۶) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۷۴) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۰/۲۱٪) به اندازه پیکسل ۲۵۰ متر تعلق دارد. ریزمقیاس‌سازی متغیر کربنات کلسیم معادل با اندازه

**ارزیابی نتایج ریزمقیاس‌سازی ویژگی‌های مورد مطالعه خاک:** نتایج ارزیابی ریزمقیاس نمودن متغیرهای شن، سیلت، رس، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل و سنگریزه از اندازه پیکسل ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متر به اندازه پیکسل ۱۰ متر با استفاده از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و درختان رگرسیون در زیر شرح داده شده است (جدول ۴).

**نتایج ارزیابی استفاده از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته:** نتایج ارزیابی ریزمقیاس‌سازی متغیر شن با استفاده از الگوریتم مدل‌های خطی تعمیم‌یافته نشان می‌دهد (جدول ۴) که ضریب تبیین تعدیل‌شده و ضریب همبستگی تطابق برای اندازه پیکسل‌های مورد مطالعه بسیار پایین است و بیش‌ترین آن به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۱ است که مربوط به اندازه پیکسل ۵۰ متری می‌باشد. همچنین کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای تخمین، ۴/۱۸٪ برای همین اندازه پیکسل به دست آمد. در مورد سیلت هم بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۴۷) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۶۸) برای اندازه پیکسل ۵۰ متر برآورد شد. همچنین اندازه پیکسل ۵۰ متر کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۲/۶۱٪) را به خود اختصاص داد. برای رس بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۲۷) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۵) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۳/۰۳٪) برای اندازه پیکسل ۲۵۰ متر به دست آمد. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است در فرایند ریزمقیاس‌سازی کربن آلی با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر، بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۵۷) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۷۵) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۲۲٪) به دست آمده است. نتایج ارزیابی ریزمقیاس‌سازی متغیر کربنات کلسیم معادل با استفاده از الگوریتم مدل‌های خطی تعمیم‌یافته نشان می‌دهد بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده و

برای اندازه پیکسل ۲۵۰ متر به دست آمد و نتایج ارزیابی به هر دو روش درختان رگرسیون و مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برای این اندازه پیکسل بسیار نزدیک هم بوده و اختلاف اندکی در حد ۰/۰۱ با هم دارند. در ریزمقیاس‌سازی کرنات کلسیم معادل از اندازه پیکسل ۲۵۰ به ۱۰ متر با روش درختان رگرسیون کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۴/۳۹٪) به دست آمد. اما بالاترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۵۲) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۷۱) برای اندازه پیکسل ۵۰ متر با روش مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برآورد گردید. بر اساس حداکثر مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده و ضریب همبستگی تطابق و حداقل مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، ریزمقیاس‌سازی سنگریزه با اندازه پیکسل ۵۰ متر با روش مدل‌های خطی تعمیم‌یافته بهترین کارایی را نشان داد.

در این مطالعه با در نظر گرفتن همه اندازه پیکسل‌ها، کم‌ترین ضرایب تعیین تعدیل‌شده و همبستگی تطابق مربوط به شن و بالاترین آن‌ها مربوط به درصد سنگریزه می‌باشد. بررسی‌های پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد وجود ضرایب تعیین کم‌تر از ۰/۵ در رابطه بین ویژگی‌های خاک و مقدار برآورد شده آن‌ها توسط روش‌های آماری و داده‌کاوی، امری مرسوم است (۴، ۱۸). علاوه بر این، باید در نظر داشت که طی عملیات ریزمقیاس‌سازی عدم قطعیت موجود در نقشه‌های رقومی به‌طور غیرقابل اجتنابی به نقشه نهایی انتقال می‌یابد (۲۰). از طرفی به‌نظر می‌رسد در هم‌تنیدگی سازندهای زمین‌شناسی، لندفرم‌ها و نحوه مدیریت کاربری‌های مختلف توسط انسان باعث پیچیدگی توزیع ویژگی‌های خاک و رابطه بین آن‌ها و متغیرهای محیطی در منطقه مورد مطالعه شده است که به نوبه خود از کارایی مدل‌های آماری و داده‌کاوی برای پیش‌بینی برخی ویژگی‌های خاک مانند شن و رس با استفاده از متغیرهای کمکی می‌کاهد.

پیکسل ۲۵۰ متر بیانگر بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده و ضریب همبستگی تطابق به‌ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۶۷ و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای تخمین (۴/۳۹٪) می‌باشد. نتایج ارزیابی ریزمقیاس‌سازی سنگریزه با استفاده از درختان رگرسیون نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۶۳) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۷۸) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۶/۲۳٪) مربوط به اندازه پیکسل ۵۰ است (جدول ۴).

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود ریزمقیاس‌سازی متغیر شن از اندازه پیکسل ۲۵۰ متر به ۱۰ متر با روش درختان رگرسیون دارای کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۳/۹٪) و بیش‌ترین ضریب همبستگی تطابق (۰/۳۶) است که نشان می‌دهد درختان رگرسیون نسبت به مدل‌های خطی تعمیم‌یافته در فرایند ریزمقیاس‌سازی این متغیر عملکرد بهتری داشته است. در فرایند ریزمقیاس‌سازی متغیر سیلت از اندازه پیکسل ۵۰ متر به اندازه پیکسل ۱۰ متر با استفاده از الگوریتم درختان رگرسیون، بالاترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۵۶) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۷۳) و کم‌ترین ریشه میانگین خطای مربعات خطا (۲/۳٪) به‌دست آمد که بیانگر کارایی بهتر این روش نسبت به مدل‌های خطی تعمیم‌یافته است. در ریزمقیاس‌سازی رس از اندازه پیکسل ۲۵۰ به ۱۰ متر با روش درختان رگرسیون کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا (۳٪) به‌دست آمد. اما بالاترین ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۲۷) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۵) برای همین اندازه پیکسل با روش مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برآورد گردید که تفاوت آن با ضریب تبیین تعدیل‌شده (۰/۲۱) و ضریب همبستگی تطابق (۰/۴۳) حاصل از ریزمقیاس‌سازی با روش درختان رگرسیون کم (به‌ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۷) است. در ریزمقیاس‌سازی کربن آلی بهترین نتایج ارزیابی

تعمیم‌یافته) و داده‌کاوی (درختان رگرسیون) اثر می‌گذارد. متغیرهای شن و رس که همبستگی ضعیفی با متغیرهای کمکی دارند، صحت و کارایی ریزمقیاس‌سازی آن‌ها با مدل‌های به کار رفته نیز ضعیف می‌باشد. هنگام و همکاران (۲۰۰۷) بر اهمیت همبستگی قوی بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی برای ایجاد یک مدل پیش‌بینی با کارایی بهتر تأکید داشته‌اند (۱۲). نتایج نشان می‌دهند اندازه پیکسل مشخصی وجود ندارد که در آن با یک مدل آماری یا داده‌کاوی خاص، همه متغیرهای خاک را با کارایی و صحت قابل قبول ریزمقیاس نمود.

باربوسا و همکاران (۲۰۰۳) و آراجو و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش ریزمقیاس‌سازی مستقیم و مدل آماری رگرسیون لجستیک و مدل‌های جمع‌پذیر تعمیم‌یافته و داده‌های کمکی، نقشه توزیع برخی گونه‌های پرندگان را ریزمقیاس کردند و نتایج ریزمقیاس‌سازی را رضایت‌بخش ارزیابی نمودند (۱، ۳) اما مک‌فرسون و همکاران (۲۰۰۶) در استفاده از این روش نتایج قابل‌قبولی به دست نیاوردند و ضعف این روش در ریزمقیاس‌سازی توزیع گونه‌های پرندگان را ناشی از کیفیت پایین داده‌های کمکی و همبستگی ضعیف آن‌ها با متغیر هدف دانستند (۲۲). درختان رگرسیون در ریزمقیاس نمودن متغیرهای مورد مطالعه (به‌ویژه سیلت، کربن آلی و سنگریزه) از اندازه پیکسل ۱۰۰ به ۱۰ متر بهتر از مدل خطی تعمیم‌یافته عمل نموده است.

با توجه به اختلاف کم مقادیر ضریب تبیین تعدیل شده، ضریب همبستگی تطابق و ریشه میانگین مربعات خطا در مدل درختان رگرسیون نسبت به مدل خطی تعمیم‌یافته برای اکثر اندازه پیکسل‌ها و متغیرهای مختلف، می‌توان گفت این مدل توانایی بیشتری در ریزمقیاس‌سازی متغیرها از خود نشان داده است. لوتو و جورت (۲۰۰۵) و جعفری و

اگر به شکل ۶- الف نقشه اولیه سیلت با اندازه پیکسل ۵۰ متر و شکل ۶- ب، یعنی نقشه سیلت ریزمقیاس شده (اندازه پیکسل ۱۰ متر) توجه شود؛ معلوم می‌گردد که متغیر کیفی ژئومورفولوژی (لندفرم‌ها) اثر زیادی بر توزیع سیلت در خاک داشته و باعث شده در نمایش توزیع این متغیر در خاک، خود را نشان دهد. درختان رگرسیون ارائه شده در شکل ۷ (تصویر سمت راست) مؤید این نکته است. در شکل ۶- پ، نقشه اولیه کربن آلی با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر و شکل ۶- ت، نقشه کربن آلی ریزمقیاس شده را نشان می‌دهد. متغیرهای کمکی مهم در ریزمقیاس‌سازی کربن آلی با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر با درختان رگرسیون ارتفاع، لندفرم و کاربری اراضی و جهت جریان بوده‌اند (شکل ۷ تصویر سمت چپ). در شکل ۶- س، نقشه سنگریزه با اندازه پیکسل ۵۰ متر و شکل ۶- ج، نقشه سنگریزه ریزمقیاس شده را نشان می‌دهد. ارتفاع شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا، تحدب و متغیرهای کیفی نقشه ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و جهت جریان، به‌عنوان متغیرهای کمکی مهم در فرایند ریزمقیاس‌سازی متغیر سنگریزه با اندازه پیکسل ۵۰ متر با مدل خطی تعمیم‌یافته تعیین گردید زیرا ضرایب آن‌ها در مدل، حداقل در سطح ۰/۰۵ درصد معنی‌دار بوده است (از ارائه متغیرهای کمکی و مهم و تأثیرگذار در فرایند ریزمقیاس‌سازی با مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و درختان رگرسیون در اندازه پیکسل‌های مختلف و نیز نقشه سایر متغیرها به دلیل حجم زیاد داده‌ها خودداری شده است). لازم به ذکر است بر اهمیت داده‌های ژئومورفولوژی در پیش‌بینی ویژگی‌ها و کلاس‌های خاک توسط پژوهشگران مختلف تأکید شده است (۱۳، ۱۴، ۲۸).

به‌طورکلی می‌توان بیان کرد متغیرهای کمکی در اندازه پیکسل‌های مختلف ارتباط و همبستگی متفاوتی با متغیر هدف دارند که بر عملکرد ریزمقیاس‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های آماری (مدل‌های خطی



همکاران (۲۰۱۲) کارایی بهتر درختان طبقه‌بندی و پیش‌بینی متغیرهای ژئومورفولوژی و خاک را تأیید رگرسیون نسبت به مدل‌های خطی تعمیم‌یافته در نموده‌اند (۱۳، ۱۷).

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی فرایند ریزمقیاس‌سازی با روش مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و درختان رگرسیون برای شش ویژگی خاک از اندازه پیکسل (ساپورت) ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متری به اندازه پیکسل ۱۰ متری (ستون‌های خاکستری رنگ نشان‌دهنده بیش‌ترین ضریب تبیین تعدیل‌شده، ضریب همبستگی تطابق و کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای هر متغیر است).

**Table 4. The validation results of downscaling process six target variables from 50, 100 and 250 m block support to 10 m using generalized linear models and regression trees (grey color in each row indicated the highest adjusted-R<sup>2</sup> and concordance correlation coefficient and the least RMSE).**

درختان رگرسیون (regression tree)			مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (generalized linear models)			شاخص‌های اعتبارسنجی (واحد) Validation indices (unit)	متغیر (واحد) Variable (unit)
اندازه پیکسل (متر) Pixel size (m)			اندازه پیکسل (متر) Pixel size (m)				
250	100	50	250	100	50		
3.9	4.36	4.4	6.06	7.26	4.18	RMSE(%)	شن (%) Sand (%)
0.14	0.08	0.07	0.09	0.05	0.11	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.36	0.25	0.25	0.25	-0.01	0.31	Concordance correlation coefficient	
2.37	2.67	2.31	4.76	5.88	2.61	RMSE(%)	سیلت (%) Silt (%)
0.54	0.44	0.56	0.18	0.21	0.47	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.72	0.65	0.73	0.38	0.34	0.68	Concordance correlation coefficient	
3.0	3.85	3.34	3.03	7.21	3.14	RMSE(%)	رس (%) Clay (%)
0.21	0.09	0.15	0.27	0.01	0.25	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.43	0.24	0.36	0.5	0.08	0.47	Concordance correlation coefficient	
0.21	0.23	0.23	0.22	0.39	0.26	RMSE(%)	کربن آلی (%) Organic carbon (%)
0.56	0.56	0.57	0.57	0.24	0.49	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.74	0.74	0.73	0.75	0.44	0.68	Concordance correlation coefficient	
4.39	5.56	5.05	4.47	12.73	4.51	RMSE(%)	کربنات کلسیم معادل (%) Equivalent calcium carbonate (%)
0.47	0.28	0.41	0.47	0.02	0.52	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.67	0.51	0.63	0.68	-0.04	0.71	Concordance correlation coefficient	
6.45	7.3	6.23	9.32	13.99	5.57	RMSE(%)	سنگریزه (%) Gravel (%)
0.6	0.51	0.63	0.51	0.15	0.7	Adjusted R <sup>2</sup>	
0.77	0.71	0.78	0.68	0.32	0.83	Concordance correlation coefficient	

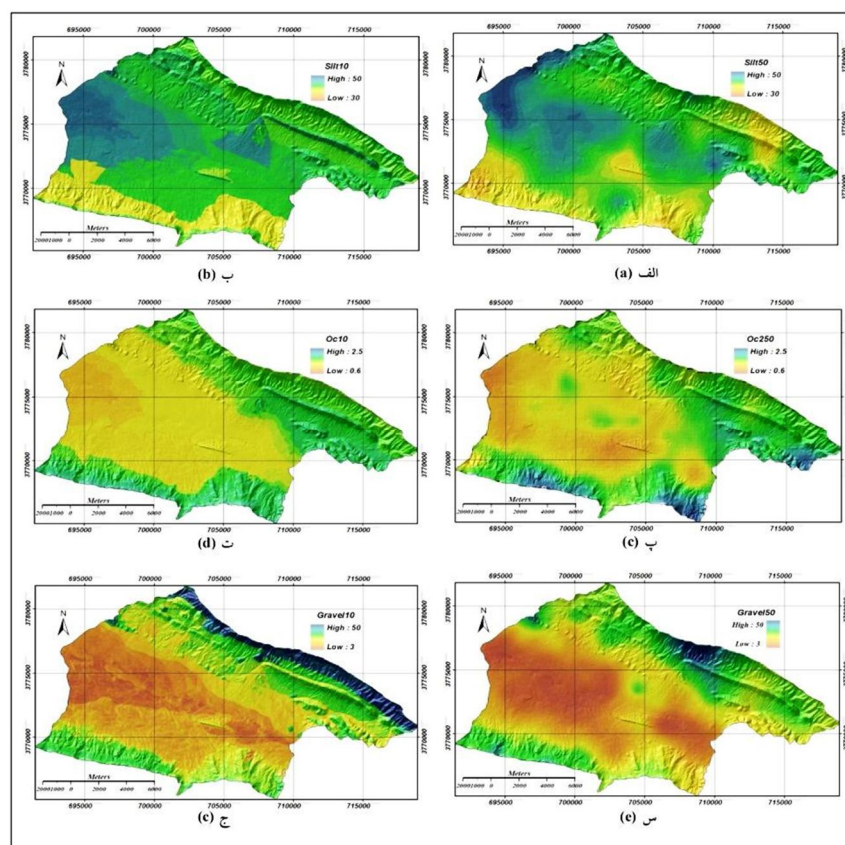
است تا نیاز امروزی کاربران داده‌های خاک را برآورده نماید. برای رسیدن به این منظور بایستی تغییرات متغیر هدف در اندازه پیکسل‌های ریز که توسط پیکسل درشت در بر گرفته شده‌اند بازسازی شود که

### نتیجه‌گیری کلی

هدف از ریزمقیاس نمودن نقشه‌های رقومی خاک با اندازه پیکسل (قدرت تفکیک مکانی) درشت، تولید نقشه‌های با اندازه پیکسل (قدرت تفکیک مکانی) ریز

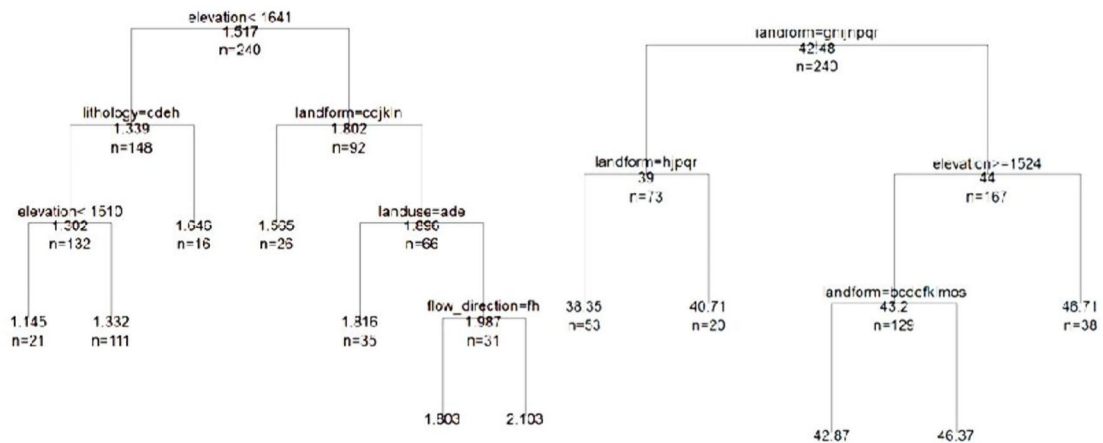
مدلسازی بسیار مهم بوده است که در این پژوهش روش درختان رگرسیون به نظر می‌رسد توانایی بیش‌تری برای ریزمقیاس نمودن اکثر متغیرها با اندازه پیکسل متفاوت دارد. همچنین می‌توان این گونه استنباط نمود که متغیرهای کمکی در مقیاس‌های مختلف، ارتباط و وابستگی متفاوتی با متغیر هدف داشته که بر کارایی ریزمقیاس‌سازی اثر می‌گذارد. با توجه به کمبود داده‌های با قدرت تفکیک مکانی ریز در کشور، ضروری است که پژوهش در زمینه انواع روش‌های ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی خاک و چالش‌های مربوط به آن توسعه پیدا کند.

برای رسیدن به این هدف در این مطالعه از روش مستقیم و متغیرهای کمکی با قدرت تفکیک ریز و مدل‌های آماری و داده‌کاوی استفاده شده است. نتایج نشان داد که این روش ریزمقیاس‌سازی توانسته است نقشه رقومی برخی متغیرهای خاک (مانند سیلت، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی و درصد سنگریزه) را با صحت و کارایی قابل‌قبولی ریزمقیاس نماید. بدیهی است همبستگی قوی بین متغیر هدف و متغیرهای کمکی سبب افزایش کارایی مدل‌ها و صحت نقشه‌های ریزمقیاس شده می‌گردد. اما نوع روش داده‌کاوی به کار رفته نیز در فرایند



شکل ۶- الف) نقشه کریجینگ بلوکی سیلت (اندازه پیکسل ۵۰ متر)، ب) نقشه سیلت ریزمقیاس شده با الگوریتم درختان رگرسیون (اندازه پیکسل ۱۰ متری)، پ) نقشه کریجینگ بلوکی کربن آلی (اندازه پیکسل ۲۵۰ متر)، ت) نقشه کربن آلی ریزمقیاس شده با الگوریتم درختان رگرسیون (اندازه پیکسل ۱۰ متری)، س) نقشه کریجینگ بلوکی سنگریزه (اندازه پیکسل ۵۰ متر)، ج) نقشه سنگریزه ریزمقیاس شده با مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (اندازه پیکسل ۱۰ متری).

Figure 6. a) block kriging map of silt (pixel size=50 m), b) downscaled map of silt by regression tree (pixel size=10 m), c) block kriging map of organic carbon (pixel size=50 m), d) downscaled map of organic carbon by regression tree (pixel size=10 m), e) block kriging map of gravel (pixel size=50 m), f) downscaled map of gravel by generalize linear models (pixel size=10 m).



شکل ۷- درختان رگرسیون (پیرایش‌یافته) برای پیش‌بینی سیلت با اندازه پیکسل ۵۰ متر (شکل سمت راست) و درختان رگرسیون (پیرایش‌یافته) برای پیش‌بینی کربن آلی با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر (شکل سمت چپ)، n = تعداد مشاهدات در هر گره را نشان می‌دهد.

Figure 7. Pruning regression tree (right) for prediction silt (pixel size=50), pruning regression tree for prediction organic carbon (pixel size=250), n= the number of observations for each node.

#### منابع

1. Araújo, M.B., Thuiller, W., Williams, P.H., and Reginster, I. 2005. Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: implications for conservation planning. *Global Ecology and Biogeography*. 14: 1. 17-30.
2. Bagheri Bodaghabadi, M., Salehi, M.H., Mohammadi, J., Toomanian, N., and Esfandiarpour Boroujeni, I. 2011. Efficiency of digital elevation model and its attributes for soil mapping using Soil-Land Inference Model (SoLIM). *J. Water Soil*. 25: 5. 1106-1118. (In Persian)
3. Barbosa, A.M., Real, R., Olivero, J., and Vargas, J.M. 2003. Otter (*Lutra lutra*) distribution modeling at two resolution scales suited to conservation planning in the Iberian Peninsula. *Biological Conservation*. 114: 377-387.
4. Beckett, P., and Webster, R. 1971. Soil variability: a review. *Soils and Fertilizers*. 34: 1-15.
5. Bierkens, M.F.P., Finke, P.A., and Willigen, P.D. 2000. Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
6. Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., and Stone, C.J. 1984. Classification and regression. Tress. Wadsworth, Belmont, CA.
7. Fatehi, Sh. 2008. Semi-detailed soil survey of Merek plain in Karkheh river basin. Soil and Water Research Institute, 54p. (In Persian)
8. Finke, P.A., Bouma, J., and Hoosbeek, M.R.E. 1998. Soil and water quality at different scales. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands.
9. Grunwald, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modelling approaches. *Geoderma*. 152: 195-207.
10. Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. 2009. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction (Second Edition), 780p.
11. Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*. 32: 1283-1298.
12. Hengl, T., Toomanian, N., Reuter, H.I., and Malakouti, M.J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*. 140: 4. 417-427.
13. Jafari, A., Ayoubi, Sh., and Khademi, H. 2012. Application of Regression Models for Prediction of Soil Classes in Some Regions of Central Iran (Zarand district, Kerman Province). *J. Water Soil*. 25: 6. 1353-1364. (In Persian)
14. Kerry, R., Goovaerts, P., Rawlins, B.G., and Marchant. B.P. 2012. Disaggregation of legacy soil data using area to point kriging for mapping soil organic carbon at the regional scale. *Geoderma*. 170: 347-358.

15. Lagacherie, P., and McBratney, A.B. 2007. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping, P 3-22. In: P. Lagacherie, et al. (Eds.), Digital soil mapping: An introductory perspective. Elsevier, New York.
16. Lin, A. 1989. Concordance correlation-coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*. 45: 255-268.
17. Luoto, M., and Hjort, J. 2005. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorph*. 67: 299-315.
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. Malone, B.P., Mcbratney, A.B., Minasny, B., and Wheeler, I. 2012. General method for downscaling earth resource information. *Computers & Geosciences*. 41: 119-125.
20. Malone, B.P., McCartney, A.B., and Minasny, B. 2013. Spatial Scaling for Digital Soil Mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77: 890-902.
21. McBratney, A.B. 1998. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 50: 51-62.
22. McPherson, J.M., Jetz, W., and Rogers, D.J. 2006. Using coarse-grained occurrence data to predict species distributions at finer spatial resolutions—possibilities and limitations. *Ecological Modeling*. 192: 499-522.
23. Merlin, O., Walker, J.P., Chehbouni, A., and Kerr, Y. 2008. Towards deterministic downscaling of SMOS soil moisture using MODIS derived soil evaporative efficiency. *Remote Sensing of Environment*. 211: 3935-3946.
24. Nabiollahi, K., Haidari, A., and Taghizadeh-Mehrjerdi, R. 2014. Digital Mapping of Soil Texture Using Regression Tree and Artificial Neural Network in Bijar, Kurdistan. *J. Water Soil*. 28: 5. 1025-1036. (In Persian)
25. Pouteau, R., Rambal, S., Ratte, J.P., Gogé, F., Joffre, R., and Winkel, T. 2011. Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: The case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia. *Remote Sensing of Environment*. 115: 117-129.
26. Rouse, J.W., Hass, R.H.J., Schell, A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351, Vol. 1, Washington, DC. Pp: 309-317.
27. Samuel-Rosa, A., Heuvelink, G.B.M., Vasques, G.M., and Anjos, L.H.C. 2015. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? *Geoderma*. 243-244: 214-227.
28. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., McBratney, A.B., Triantafilis, J., Sarmadian, F., and Toomanian, N. 2012. Digital soil mapping of soil classes using decision trees in central Iran, P 197-202. In: Minasny, B., B.P. Malone and A.B. McBratney (Eds.), Digital Soil Assessment and Beyond. CRC, London.
29. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Minasny, B., Sarmadian, F., and Malone, P.B. 2013. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma*. 213: 15-28.
30. Taylor, J.A., Jacob, F., Galleguillos, M., Prévot, L., Guix, N., and Lagacherie, P. 2013. The utility of remotely-sensed vegetative and terrain covariates at different spatial resolutions in modelling soil and water table depth (for digital soil mapping). *Geoderma*. 193: 83-93.
31. Van Deventer, A.P., Ward, A.D., Gowda, P.H., and Lyon, J.G. 1997. Using Thematic Mapper Data to Identify Contrasting Soil Plains and Tillage Practices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 63: 87-93.
32. Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., and Bayaer, W. 2006. Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *Inter. J. Rem. Sens*. 27: 2411-2422.
33. Zinck, J.A. 1989. Physiography and soils. Lecture notes for K6 course. Soils Division, (ITC), Enschede, the Netherlands, 132p.



## **Downscaling digital maps of some soil surface properties (A case study: Merek sub catchment, Kermanshah province)**

**\*Sh. Fatehi<sup>1</sup>, J. Mohammadi<sup>2</sup>, M.H. Salehi<sup>2</sup>, A. Momeni<sup>3</sup>,  
N. Toomanian<sup>4</sup> and A. Jafari<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, <sup>3</sup>Associate Prof., Soil and Water Research Institute, <sup>4</sup>Assistant Prof., Agriculture and Natural Resource Research Center of Esfahan, <sup>5</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Bahonar University of Kerman

Received: 01/14/2015; Accepted: 07/06/2015

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Digital soil maps with fine resolution are one of the basic needs of users and decision-makers in agriculture, natural resource and environment. However, in our country, there is scarcity of this kind of data and producing fine resolution soil data is very costly. Therefore, downscaling digital soil maps arises as a suitable option in order to produce fine resolution soil data. Objectives of this study were to examine and evaluate downscaling digital maps of some soil surface properties from block supports 50, 100 and 250 m to block support 10 m using direct approach across Merek sub catchment in Kermanshah province with an area of 24000 ha.

**Materials and Methods:** Firstly, spatial structure information of soil surface properties including %sand, %silt, %clay, %organic carbon, %equivalent calcium carbonate and %gravel were determined using legacy data (320 randomized point samples) and variography. Then, block kriging maps were produced with block support 50, 100 and 250 m. Terrain attributes, Landsat images, geology map, geomorphology and land use maps were used in this study as auxiliary variables. Correlation coefficient between auxiliary variables and target variables was calculated and auxiliary variables were significant at the 0.01 level selected as model inputs. Afterwards, downscaling direct approach was used. In this approach, relationship between the soil properties and auxiliary variables with coarse resolution were identified using generalized linear models (GLMs) and regression tree. Next, calibrated parameters and fine resolution covariates were applied to prediction soil properties in fine resolution. Models were trained on 75% of the block support data in accordance with original data and evaluated on the remaining 25%, using k-fold validation (k=4) procedure.

**Results:** The results showed that amount of sand and gravel had minimum and maximum correlations with covariates, respectively. Considering all the pixel sizes, the highest correlation were obtained among soil properties and elevation, direct duration, convexity, slope, topographic wetness index and mrvbf. Downscaling gravel map from block support 50 m to 10 m by GLMs showed best performance (RMSE=5.57%). Downscaling sand, clay, equivalent calcium carbonate and organic carbon from 250 m block support and silt from of 50 m to 10 m block support using regression tree led to estimate the lowest root mean square error (3.9%, 3%, 4.39%, 0.21% and 2.31% respectively). Besides, regression trees showed the best performance in downscaling of soil properties with different pixel size.

**Conclusion:** It seems that direct approach would be able to downscale digital maps of soil variables (such as silt, calcium carbonate equivalent, organic carbon content and gravel) with acceptable accuracy and efficiency. Obviously, GLMs and regression tree can lead to strong results if the correlation between soil properties and auxiliary variables is high. It can be concluded that various auxiliary variables at diverse pixel sizes have different relationships with the target variable which affect the performance of the downscaling.

**Keywords:** Downscaling, Soil digital mapping, Auxiliary variables, Soil properties

---

\* Corresponding Author; Email: shahrokh.fatehi@gmail.com

