



ریزمقیاس‌سازی مکانی نقشه رقومی کربن آلی خاک با استفاده از الگوریتم دیزور

*شاهرخ فاتحی^۱، کامران افتخاری^۲ و جلال قادری^۱

^۱استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات،

آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران،

^۲استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

چکیده

سابقه و هدف: در بیش‌تر پروژه‌های ملی و منطقه‌ای به‌منظور تولید نقشه رقومی ویژگی‌های خاک، تراکم نمونه‌برداری، به‌دلیل پرهزینه و زمان‌بر بودن، کم در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل نقشه‌های رقومی تولیدی دارای قدرت تفکیک مکانی درشت (بیش از ۹۰ متر) هستند که در مقیاس مزرعه‌ای (قدرت تفکیک مکانی کم‌تر از ۳۰ متر) قابل استفاده نیستند. یکی از راه‌کارهای حل این مسأله، ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی با قدرت تفکیک مکانی درشت با استفاده از متغیرهای محیطی با قدرت تفکیک مکانی ریز است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی کارایی الگوریتم ریزمقیاس‌سازی دیزور برای تولید نقشه رقومی کربن آلی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از نقشه رقومی کربن آلی خاک با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر می‌باشد.

مواد و روش‌ها: ناحیه مورد مطالعه به وسعت تقریبی ۱۴۰۸۴ هکتار بخش کوچکی از حوضه آبریز کرخه واقع در استان کرمانشاه می‌باشد. در ابتدا با استفاده از ۱۱۰ نقطه مشاهداتی تصادفی و روش کریجینگ بلوکی، نقشه رقومی کربن آلی خاک در محدوده مورد مطالعه با اندازه پیکسل ۹۰ متر تهیه گردید. سپس مجموعه‌ای شامل ۲۳ متغیر کمکی محیطی مرتبط با فاکتورهای اسکورین شامل اقلیم، توپوگرافی، موجودات زنده و مواد مادری به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تهیه متغیرهای محیطی اقلیمی و توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاع SRTM و برای تهیه شاخص‌های پوشش گیاهی و زمین‌شناسی از تصاویر ماهواره لندست ۵ استفاده شد. از الگوریتم دیزور که یک فرایند تکراری برای نزدیک شدن به راه‌حلی برای حفظ جرم است و مدل‌های خطی چندمتغیره، افزودنی تعمیم‌یافته، کویست، جنگل تصادفی و مدل تجمعی برای تولید نقشه‌های ریزمقیاس استفاده گردید. برای ارزیابی کارایی روش‌های مختلف، از مقایسه نقشه‌های بازسازی‌شده (حاصل از تبدیل نقشه‌های ریزمقیاس با اندازه پیکسل ۳۰ متر به ۹۰ متر با استفاده از فیلتر میانگین) با نقشه پایه (نقشه کریجینگ بلوکی) و معیارهای ارزیابی نارایی، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی تطابق استفاده شد. هم‌چنین ساختار مکانی نقشه‌های بازسازی شده و نقشه پایه با استفاده پارامترهای نیم‌تغییرنمای تجربی بررسی گردید.

* مسئول مکاتبه: shahrokh.fatehi@gmail.com

یافته‌ها: رابطه بین متغیرهای کمکی با کربن آلی با استفاده از روش‌های داده‌کاوی در چهارچوب الگوریتم دیزور منجر به تولید نقشه‌های ریزمقیاس شد. نتایج نشان داد توابع تراکم احتمال نقشه‌های بازسازی در مدل کویست بسیار نزدیک به تابع تراکم احتمال نقشه پایه است. همچنین نقشه ریزمقیاس شده حاصل از مدل کویست دارای بیشترین ضریب تبیین بازسازی (۰/۷۵) و ضریب همبستگی تطابق بازسازی (۰/۸) و کمترین ریشه میانگین مربعات خطای بازسازی (۰/۰۶) و ناریبی بازسازی (۰/۰۰۱) بوده و بنابراین دارای بالاترین کارایی در ریزمقیاس‌سازی نسبت به مدل‌های مختلف داده‌کاوی مورد بررسی است. همچنین مشخص شد استفاده از روش مدل‌سازی تجمعی در مقایسه با مدل‌های داده‌کاوی منفرد، صحت و دقت نقشه‌های ریزمقیاس شده را افزایش می‌دهد. مطالعه ساختار مکانی نقشه‌های ریزمقیاس شده با روش‌های داده‌کاوی در مقایسه با نقشه پایه (نقشه کریجینگ بلوکی کربن آلی خاک) نشان داد که واریانس کل نیم‌تغییرنمای نقشه بازسازی شده مدل کویست نسبت به سایر مدل‌ها به واریانس کل نیم‌تغییرنمای نقشه پایه بسیار نزدیک‌تر است.

نتیجه‌گیری: الگوریتم دیزور اصلاح شده به دلیل استفاده از روش‌های مختلف داده‌کاوی و مدل تجمعی، یک گزینه عملی برای ریزمقیاس‌سازی نقشه ویژگی‌های خاک با قدرت تفکیک مکانی درشت است. با توجه به کارایی بالای این روش، می‌توان از آن برای تولید نقشه‌های ویژگی‌های خاک در مقیاس مزرعه‌ای از نقشه‌های رقومی در مقیاس منطقه‌ای و ملی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: داده‌کاوی، قدرت تفکیک مکانی، کریجینگ بلوکی، نقشه‌برداری رقومی خاک

مقدمه

از اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی، با افزایش توان پردازش رایانه‌ها و توسعه تکنیک‌های یادگیری ماشین، علم پدومتری یا خاک‌سنجی شروع به رشد نمود و در راستای آن شاخه مهم نقشه‌برداری رقومی خاک ایجاد گردید (۲). نقشه‌برداری رقومی خاک توسط مک‌برتنی و همکاران (۲۰۰۳) پیشنهاد شد (۱۴). این پژوهشگران در اصل مدل خاک‌سازی ینی (۱۹۴۱) را توسعه دادند (۸) که به آن اصطلاحاً مدل اسکورپن^۱ می‌گویند. در این مدل هفت عامل شامل ویژگی‌های خاک در همان محل (S)، اقلیم (C) موجودات زنده (O)، پستی و بلندی (R)، مواد مادری (P)، زمان (A) و موقعیت جغرافیائی (N) را برای پیش‌بینی مکانی خاک در نظر گرفته می‌شود.

فاکتورهای اضافه شده در این مدل، ویژگی‌ها یا کلاس‌های خاک و موقعیت مکانی آن‌ها می‌باشد. معادله اسکورپن به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$S_a = (S, C, O, R, P, A, N) \quad (1)$$

که در آن، S_a مقدار ویژگی خاک (شامل خصوصیات و کلاس‌های خاک) برآورد شده است. این مدل مفهومی تنها به داده‌ها و مدل‌های استنباط مکانی خاک (شامل روش‌های آماری و زمین‌آماری) که می‌توانند برای تخمین و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده به کار روند؛ توجه دارد.

سپس از طریق ابتکاراتی مانند تهیه نقشه رقومی جهانی خاک، در بیش‌تر کشورهای جهان به‌طور فزاینده‌ای تهیه نقشه‌های رقومی ملی خاک مورد توجه

کاربران را رفع نمی‌نماید؛ استفاده از ریزمقیاس‌سازی^۳ گزینه مناسبی برای تهیه نقشه‌ها و اطلاعات مورد نیاز کاربر در اندازه پیکسل مناسب خواهد بود (۱۵). ریزمقیاس‌سازی را می‌توان به‌عنوان فرایند انتقال اطلاعات در یک مقیاس یا قدرت تفکیک مکانی درشت‌تر به مقیاس یا قدرت تفکیک مکانی ریزتر توسط توابع تجربی و مکانیستیکی تعریف نمود (۱۵). در حال حاضر، ریزمقیاس‌سازی اطلاعات مکانی خاک به‌عنوان زیرشاخه‌ای از علم نقشه‌برداری رقومی خاک برای به‌دست آوردن اطلاعات خاک در مقیاس مزرعه با کم‌ترین هزینه و صرف زمان، مورد توجه نقشه‌برداران رقومی خاک قرار گرفته است. ملانو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از محیط نرم افزار R و مدل تعمیم‌یافته افزودنی^۴ یک الگوریتم تکرارپذیر شامل تطبیق و برازش برای بهینه‌سازی ریزمقیاس‌سازی به نام دیزور^۵ پیشنهاد کردند و از این الگوریتم برای ریزمقیاس‌سازی نقشه‌های رقومی کربن آلی استفاده نمودند (۱۵). رودی‌یر و همکاران (۲۰۱۷) الگوریتم دیزور را اصلاح نمودند به‌گونه‌ای که بتوان از مدل‌های رگرسیونی دیگر مثل کوئیست^۶ و جنگل تصادفی^۷ برای پیش‌بینی متغیرهای هدف در طی فرآیند ریزمقیاس‌سازی استفاده نمود (۲۵). ملانو و همکاران (۲۰۱۷) از روش دیزور به‌منظور تولید نقشه‌های رقومی کربن آلی خاک در مقیاس مزرعه‌ای (قدرت تفکیک مکانی ۱۰ در ۱۰ متر) براساس نقشه ملی کربن آلی استرالیا با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر استفاده نمودند (۱۷). در ایران نیز، فاتحی و همکاران (۲۰۱۵) از دو رویکرد نزول مقیاسی مستقیم^۸ و نمونه‌برداری نقطه‌ای^۹ در قالب مدل‌های خطی

قرار گرفت به‌گونه‌ای که در سال ۲۰۰۸ ائتلاف^۱ تهیه نقشه ویژگی‌های رقومی خاک جهان^۲ با رزولوشن ۹۰ در ۹۰ متر مطرح و تشکیل گردید که ۵ کمیته در قاره‌های مختلف هدایت و اجرای آن را به عهده دارند (۱۸). در اتحادیه اروپا نمونه‌های خوبی از به‌روزرسانی نقشه‌های خاک با استفاده از نقشه‌برداری و مدل‌سازی رقومی خاک انجام شده است از جمله این اقدامات می‌توان به مطالعه کمپن (۲۰۰۹) اشاره نمود (۹).

نقشه‌های رقومی خاک به فرمت رستری (۷) و در مقیاس ملی و منطقه‌ای تهیه می‌شوند و قدرت تفکیک مکانی نقشه‌ها، ترجمان دقیق مقیاس خروجی نقشه‌ها هستند. انتخاب قدرت تفکیک مکانی مناسب نقشه‌های رقومی خاک، سؤال مهمی در مبحث نقشه‌برداری رقومی خاک است (۲۷). هنگل (۲۰۰۶) نشان داد اندازه پیکسل نقشه‌های رقومی خاک متأثر از فاصله نمونه‌ها، تراکم نمونه‌برداری و اندازه پیکسل متغیرهای کمکی است (۵). اما در عمل، بیش‌تر مواقع به‌دلیل هزینه زیاد جمع‌آوری نمونه و تجزیه آزمایشگاهی نمونه‌های خاک، تراکم نمونه‌برداری کم بوده و به‌عبارتی تعداد نمونه‌های کمی در بیش‌تر پروژه‌های ملی برداشت می‌شود. این عوامل در نهایت منجر به تولید نقشه‌های پیش‌بینی با اندازه پیکسل درشت می‌گردد که جوابگوی بیش‌تر نیازهای کاربران و تصمیم‌سازان نیست. به دیگر سخن، همخوانی بین قدرت تفکیک مکانی اطلاعات رقومی موجود با اهداف پروژه و سیاست‌گذاری‌های لازم برای ناحیه مورد مطالعه وجود ندارد به‌گونه‌ای که در بسیاری موارد، کاربران به داده‌های خاک در مقیاسی ریزتر از آنچه که موجود است نیاز دارند (۱۶). بنابراین در شرایطی که جمع‌آوری دوباره نمونه‌های خاک، هزینه‌بر و وقت‌گیر است و هم‌چنین داده‌های به‌دست آمده در گزارش‌های خاکشناسی (داده‌های میراثی) نیاز

3- Downscaling
4- Generalized additive model (GAM)
5- Dissever
6- Cubist
7- Random forest
8- Direct approach
9- Point sampling approach

1- Consortium
2- www.globalsoilmap.net

میلی متر است. ناحیه مورد مطالعه عمدتاً تحت کشت محصولات دیم شامل گندم، نخود و جو بوده و به صورت پراکنده کشت آبی محصولات گندم، ذرت، چغندر قند، گوجه فرنگی و سیب زمینی با استفاده از آب زیرزمینی در منطقه مشاهده می شود (۳).

داده های خاک

نقشه رقومی کربن آلی: در بهار و تابستان سال ۱۳۸۴، ۱۱۰ نمونه از خاک سطحی با توزیع تصادفی در منطقه مطالعاتی جمع آوری (شکل ۱) و مقدار کربن آلی در نمونه ها با روش سوزاندن تر اندازه گیری شد (۲۹). در ادامه با استفاده از روش کریجینگ بلوکی^۳ نقشه رقومی کربن آلی خاک در محدود مورد مطالعه با اندازه پیکسل ۹۰ متر تهیه گردید. اندازه پیکسل مناسب برای این نقشه خروجی بر اساس مطالعات هنگل (۲۰۰۶) تعیین گردید (۵). اندازه پیکسل مناسب بر اساس تراکم نمونه برداری از طریق معادله زیر قابل محاسبه است:

$$P=0.25(0.5)*\sqrt{\frac{A}{N}} \quad (2)$$

که در آن، P اندازه پیکسل مناسب، A مساحت ناحیه مورد مطالعه بر حسب m^2 ، N تعداد نقاط نمونه برداری در ناحیه مورد مطالعه است.

متغیرهای محیطی: مجموعه ای شامل ۲۳ متغیر کمی محیطی مرتبط با فاکتورهای اسکورپن (۱۴) شامل اقلیم، توپوگرافی، موجودات زنده و مواد مادری به عنوان متغیرهای پیش بینی کننده مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). به منظور تهیه شاخص های اقلیمی و توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر ماهواره^۴ SRTM استفاده گردید. برای پیش پردازش مدل

تعمیم یافته از جمله درختان رگرسیون^۱ و شبکه عصبی مصنوعی^۲ به منظور نزول مقیاسی نقشه های رقومی کربن آلی خاک استفاده نمودند. نتایج بررسی آنها نشان داد عملکرد ریزمقیاس سازی به روش نمونه برداری نقطه ای تا حدودی از روش مستقیم بهتر است. همچنین در هر دو روش ریزمقیاس سازی، استفاده از مدل درختان رگرسیون صحت و کارایی بالاتری نسبت به مدل های خطی تعمیم یافته و شبکه عصبی نشان داد (۴).

با توجه به اهمیت کربن آلی خاک در کشاورزی پایدار و حفاظتی و همچنین نقش آن در گرمایش زمین و تغییر اقلیم، برآورد مقدار آن در خاک اهمیت زیادی در مدیریت کربن آلی خاک، حاصلخیزی خاک، کمک به افزایش ترسیب کربن در خاک و کاهش گرمایش زمین خواهد داشت (۱۲). به منظور برآورد میزان کربن آلی خاک در مقیاس مزرعه ای این پژوهش در بخشی از دشت مرک استان کرمانشاه اجرا گردید. بنابراین هدف از انجام این پژوهش ارزیابی کارایی روش دیزور اصلاح شده برای ریزمقیاس سازی نقشه های رقومی کربن آلی خاک از نقشه های رقومی با قدرت تفکیک مکانی درشت (۹۰ متر) به اندازه پیکسل ۳۰ متر (مقیاس مزرعه ای) است.

مواد و روش ها

ناحیه مورد مطالعه به وسعت تقریبی ۱۴۰۸۴ هکتار بخش کوچکی از حوضه آبریز کرخه واقع در استان کرمانشاه را تشکیل می دهد. این محدوده در مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 05'$ تا $34^{\circ} 20'$ طول شرقی و $48^{\circ} 21'$ تا $48^{\circ} 08'$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). دامنه ارتفاع ناحیه مورد نظر از ۱۴۷۷ متر تا ۱۸۷۷ متر متغیر است. میانگین دمای سالانه $13/2$ درجه سانتی گراد و میانگین بارندگی سالانه $481/4$

3- Block kriging

4- Shuttle Radar Topography Mission, <http://srtm.usgs.gov/>

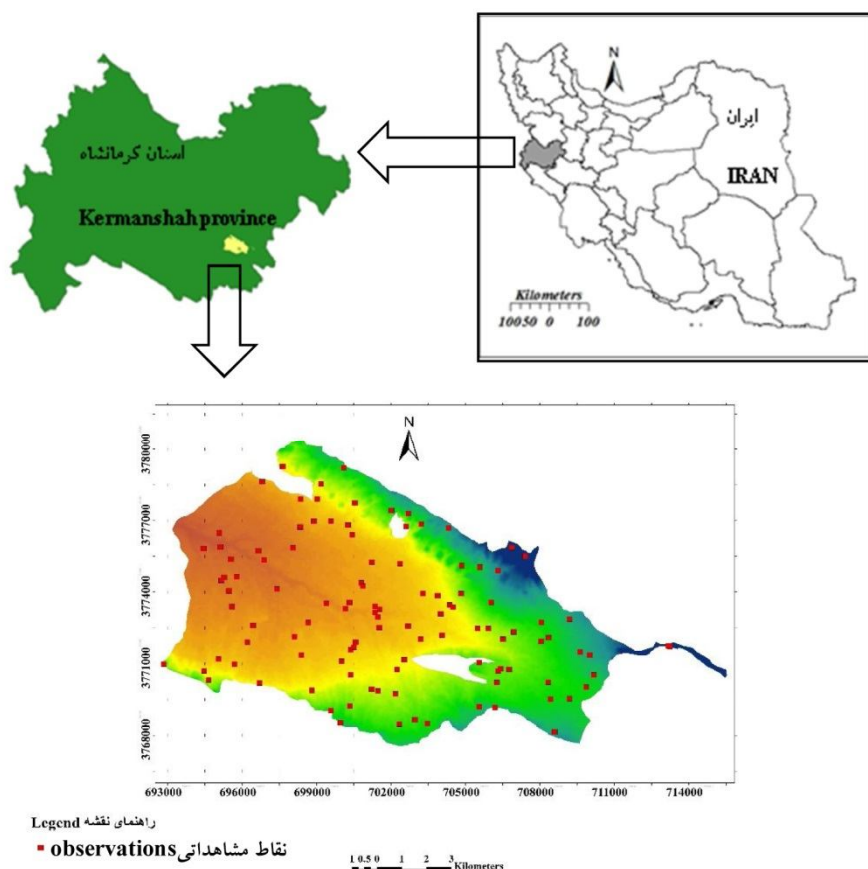
1- Regression trees

2- Artificial neural network

شاخص‌های توپوگرافی: شاخص‌های توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب، تحدب، بافت و موقعیت شیب میانی، شاخص موقعیت توپوگرافیک، شاخص همگرایی، شاخص همواری درجه تفکیک بالا (۱)، شاخص ناهمواری سرزمین (۲۴) به منظور نشان دادن مورفومتری در مقیاس محلی انتخاب شده‌اند. عمق دره، فاصله عمودی تا شبکه آبراهه مربوط به وضعیت شبکه آبراهه‌ها و عدد ناهمواری میلتون، شاخص خیسی توپوگرافی، شاخص قدرت جریان مربوط به مشخصات هیدرولوژیکی بوده (۱۹) که همگی متغیرهای کمکی در ارتباط با عامل توپوگرافی اسکورپن می‌باشند (جدول ۱).

رقومی ارتفاع یعنی تصحیح ناهمواری محلی آن از روش پلیتیر (۲۰۰۸) استفاده شد (۲۲). شاخص‌های پوشش گیاهی و مواد مادری از تصاویر ماهواره لندست ۵ مربوط به خردادماه ۱۳۸۴ در زمان نمونه‌برداری خاک به دست آمد. همه تصحیحات رادیومتری، اتمسفری و توپوگرافی بر روی این تصاویر با استفاده از بسته نرم‌افزاری RStoolbox در محیط R انجام گرفت (۲۳).

شاخص‌های اقلیمی: چهار شاخص اقلیمی شامل تابش مستقیم، تابش پخشیده، نسبت تابش مستقیم به پخشیده و گرمایش ناهمسانگرد روزانه با استفاده از نرم افزار SAGA و بر اساس مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری تهیه گردید (۲۶).



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

Figure 1. The position of study area in Iran and the province of Kermanshah and location of observation points.

شاخص‌های گیاهی: شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۱ در فرمول اسکورپن به‌عنوان نماینده عامل پوشش گیاهی استفاده می‌شود NDVI به‌صورت تعریف می‌شود:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (۳)$$

که در آن، NIR باند مادون‌قرمز نزدیک و RED باند قرمز تصاویر ماهواره لندست ۵ است. این شاخص برای برآورد تعداد زیادی از ویژگی‌های پوشش گیاهی از جمله وزن زنده، غلظت کلروفیل در برگ‌ها و تولید گیاهی به‌کار می‌رود. شاخص دیگری به‌عنوان معرف عامل پوشش گیاهی در فرمول اسکورپن شاخص پوشش گیاهی تصدیق شده^۲ یا SAVI است. شاخص SAVI از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$SAVI = \frac{NIR-RED}{(NIR+RED+L)} (1+L) \quad (۴)$$

که در آن، L فاکتور تصحیح می‌باشد که مقدار صفر برای پوشش گیاهی متراکم، ۱ برای پوشش گیاهی تنک و ۰/۵ برای پوشش گیاهی متوسط است (۶). شاخص‌های مواد مادری: شاخص اندازه ذرات^۳ و شاخص رس^۴ به‌عنوان نماینده مواد مادری در فرمول اسکورپن استفاده شدند (۲۸). شاخص اندازه ذرات از نسبت اختلاف باند قرمز و آبی به مجموع باند آبی، سبز و قرمز به‌دست آمد. این شاخص نشان‌دهنده درشت بودن اندازه ذرات در خاک سطحی است که با اندازه شن ریز همبستگی دارد. علاوه بر این، شاخص رس به‌صورت نسبت باند ۵ به باند ۷ بیان می‌شود (۳۰).

روش ریزمقیاس‌سازی دیزور اصلاح‌شده: برای اجرای این پژوهش، از روش دیزور اصلاح‌شده استفاده شد (۲۵). الگوریتم دیزور در ابتدا توسط ملانو و همکاران (۲۰۱۲) پیشنهاد گردید که روشی برای ریزمقیاس‌سازی یک نقشه رقومی با قدرت تفکیک مکانی درشت با استفاده از متغیرهای کمکی با قدرت تفکیک ریز است (۱۵). آن‌ها از مدل تعمیم‌یافته افزودنی برای برقراری رابطه بین متغیرهای کمکی (با قدرت مکانی ریز) و متغیر هدف با قدرت مکانی درشت استفاده نمودند. از این مدل در یک فرآیند تکراری برای نزدیک‌شدن به راه‌حلی برای حفظ جرم استفاده می‌شود به‌گونه‌ای که میانگین پیش‌بینی‌های متغیر هدف در اندازه پیکسل ریز، معادل با مقادیر متغیر هدف در اندازه پیکسل درشت (دربرگیرنده پیکسل‌های ریز) گردد.

الگوریتم دیزور شامل مراحل زیر است (شکل ۲):

- ۱- با استفاده از روش بازچینی نزدیک‌ترین همسایه، نقشه متغیر هدف که دارای اندازه پیکسل درشت (۹۰ متر) است به نقشه‌ای با گستره و اندازه پیکسل (۳۰ متر) مطابق با اندازه پیکسل نقشه متغیرهای کمکی تبدیل می‌شود؛
- ۲- رگرسیون مقادیر متغیر هدف در شبکه‌بندی ریز در مقابل متغیرهای کمکی مناسب انجام می‌شود؛
- ۳- برای به‌دست آوردن نقشه پایه اولیه؛ پیش‌بینی‌های متغیر هدف با استفاده از رگرسیون در مرحله قبل، با درشت مقیاس‌سازی از طریق میانگین‌گیری مقادیر اندازه پیکسل‌های ریز انجام می‌شود؛
- ۴- برآورد انحراف از توازن جرم برای هر اندازه از پیکسل درشت یعنی؛ میانگین مقادیر در پیکسل‌های ریز = مقدار اندازه پیکسل درشت؛
- ۵- از پارامتر انحراف از توازن جرم یا فاکتور انحراف، برای تصحیح برآوردهای شبکه ریزمقیاس استفاده شد؛

- 1- Normalized difference vegetation index
- 2- Soil Adjusted Vegetation Index
- 3- Grain Size Index
- 4- Clay index

$$Y_i = \sum_{k=1}^{K=k} W_k X_{ik} \quad (5)$$

که در آن، Y_i ترکیب خروجی مدل‌ها در نقطه i ، k تعداد مدل‌های سهم در پیش‌بینی، X_{ik} خروجی k امین مدل و W_k ضریب وزنی اختصاص یافته به k امین مدل است. در مدل میانگین یا تجمعی می‌توان از روش‌های مختلفی شامل ساده‌ترین حالت که در آن اوزان مدل‌های مختلف یکسان در نظر گرفته می‌شود تا مدل‌های پیچیده‌ای مانند مدل میانگین بیزی، استفاده نمود. در این پژوهش برای تعیین اوزان مدل‌ها از رابطه ۶ استفاده شده است

$$W_k = \frac{R_k^2}{\sum_{k=1}^n R_k^2} \quad (6)$$

که در آن، R_k^2 ضریب تبیین k امین مدل و n تعداد مدل‌ها است.

بررسی کارایی ریزمقیاس‌سازی: با توجه به مسأله حفظ جرم، نقشه پایه با نقشه بازسازی شده^۳ ارزیابی می‌شود. نقشه بازسازی شده یعنی نقشه ریزمقیاس‌سازی شده‌ای که از طریق میانگین بلوکی به نقشه‌ای همسان با نقشه پایه از نظر اندازه پیکسل تبدیل شده است (۱۷).

معیارهای مختلف از جمله ناریبی، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای بازسازی و ضریب همبستگی تطابق (۱۳) کارایی ریزمقیاس‌سازی را بیان می‌کنند.

ریشه میانگین مربعات خطای بازسازی $RMSEr$ برای کمی‌سازی ارزیابی مسأله حفظ جرم به صورت معادله زیر استفاده می‌شود:

$$RMSEr = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (7)$$

ضریب همبستگی تطابق (CCC) توافق بین نقشه بازسازی شده و نقشه پایه به‌عنوان یک مقدار بین ۰ (اختلاف مطلق) و ۱ (توافق مطلق) تعیین می‌کند.

۶- اگر تعداد تکرارهای اجرای مدل بزرگ‌تر از یک باشد، این مسأله که آیا برآوردهای درشت مقیاس‌سازی از تکرار قبلی متفاوت است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر تغییر برآوردها از یک آستانه از پیش تعریف شده بیش‌تر باشد به مرحله اول باز می‌گردد، در غیر این صورت اجرای مدل پایان می‌یابد. ملانو و همکاران (۲۰۱۲) از میانگین اختلاف واقعی بین نقشه درشت مقیاس‌سازی شده تکرار حاضر و تکرار قبلی استفاده کردند. آن‌ها از یک آستانه اختیاری ۰/۰۰۱ برای توقف تکرارها استفاده نمودند (۱۸).

رودیر و همکاران (۲۰۱۷) با اضافه نمودن مدل خطی چندمتغیره، کویست و جنگل تصادفی به این روش ریزمقیاس‌سازی، کارایی الگوریتم قبلی که توسط ملانو و همکاران (۲۰۱۲) پیشنهاد شده بود را بهبود بخشیدند و تحت بسته نرم‌افزاری به همین نام *dissever* در سال ۲۰۱۷ برای استفاده در محیط *R* منتشر نمودند^۱ در این پژوهش از بسته نرم‌افزاری *Gstat* (۲۱) برای تولید نیم‌تغییرنمای تجربی و برازش مدل مناسب بر آن و تولید نقشه کریجینگ بلوکی استفاده شد. هم‌چنین بسته نرم‌افزاری *Caret* برای بهره‌برداری از ساختار مدل‌های مرتبط با بسته *dissever* شامل کویست، جنگل تصادفی، مدل‌های خطی چندمتغیره و افزودنی تعمیم‌یافته مورد استفاده قرار گرفت (۱۰).

مدل تجمعی^۲: یکی از راه‌های بهبود کارایی مدل‌سازی رقومی ویژگی‌های خاک که در نقشه‌برداری رقومی خاک مورد توجه قرار نگرفته است استفاده از مدل میانگین یا مدل تجمعی می‌باشد (۲۰). مدل تجمعی، ترکیب نمودن پیش‌بینی مدل‌های مختلف می‌باشد. اصول بنیادین این روش می‌تواند توسط رابطه ساده زیر توضیح داده شود:

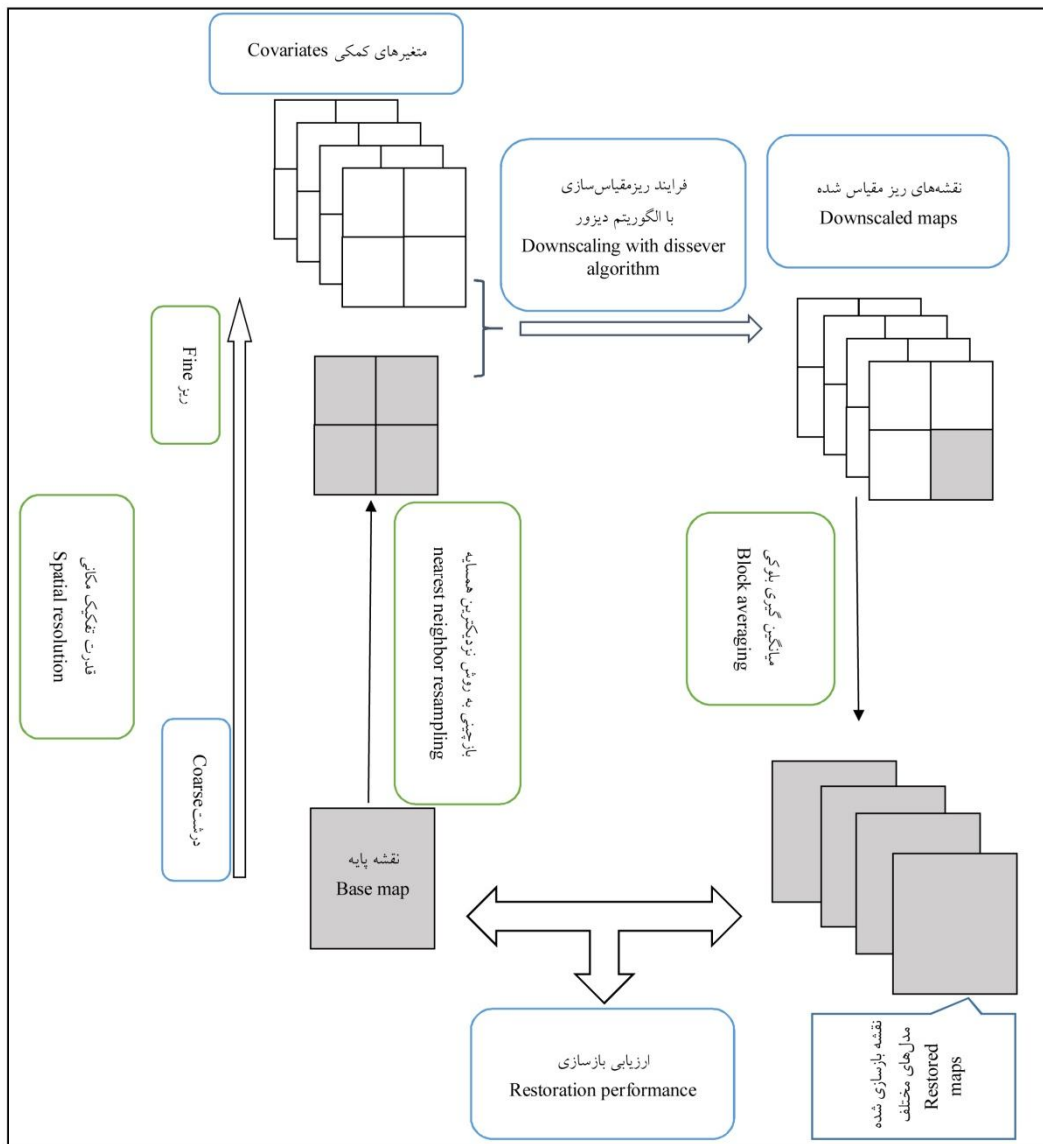
1- (<https://github.com/pierreroudier/dissever>)
2- Ensemble model

ساختار مکانی: به منظور مقایسه ساختار مکانی نقشه پایه با نقشه بازسازی شده حاصل از نقشه های ریزمقیاس شده با مدل های مختلف، نیم تغییرنمای تجربی ترسیم شد و گستره مختلفی از مدل های مختلف شامل کروی، نمایی، دایره ای، کروی پنج نقطه ای و گوسین با استفاده از بسته نرم افزاری gstat بر نیم تغییرنماهای به دست آمده برازش داده شد (۲۱). سپس واریانس کل آنها مورد مقایسه قرار گرفت.

$$CCC = \frac{2.r.\hat{\sigma}}{\sigma^2 + \hat{\sigma}^2 + (m-M)^2} \quad (8)$$

$$Biase = m - M \quad (9)$$

که در آنها، X نقشه پایه، Y نقشه بازسازی شده و n تعداد پیکسل های نقشه، r ضریب همبستگی و $\hat{\sigma}$ و σ به ترتیب انحراف استاندارد بین داده های نقشه پایه و بازسازی شده است، M و m میانگین داده های نقشه پایه و نقشه بازسازی شده می باشد.



شکل ۲- فلوچارت مراحل مختلف ریزمقیاس سازی با الگوریتم دیزور.

Figure 2. Flowchart of downscaling steps using dissever algorithm.

جدول ۱- متغیرهای کمکی محیطی حاصل از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره لندست ۵ (خرداد ۱۳۸۴).

Table 1. Environmental covariates of digital elevation models and Landsat 5 images.

توصیف آماری متغیرهای کمکی			واحد Unit	Environmental covariates متغیر کمکی محیطی	عامل اسکورپن Scorpan factor
میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min			
282.6	294.2	218.2	kWh / m ²	تابش پخشیده Diffuse Insolation	
1465.2	1949.7	353.6	kWh / m ²	تابش مستقیم Direct Insolation	اقلیم
5.19	8.19	1.53	-	نسبت تابش مستقیم به پخشیده Ratio Direct to Diffuse	Climate
0.01	0.7	-0.66	-	گرمایش ناهمسانگرد روزانه Anisotropic Diurnal Heating	
3.33	6.28	0.00	رادیان Radian	جهت شیب Aspect	
46.96	77.66	21.23	-	تحدب Convexity	
0.00	98.75	-97.73	-	شاخص همگرایی Convergence Index	
1684	2477	1462	متر m	ارتفاع Elevation	
18.01	1.55	0.00	-	عدد ناهمواری میلتن Melton Ruggedness Number	
0.58	0.99	0.00	-	موقعیت شیب میانی Mid Slope Position	
5.98	1.58	0.00	-	MRVBF	
0.87	0.13	0.00	رادیان Radian	شیب Slope	توپوگرافی Relief
81.65	20238.57	0.00	-	شاخص قدرت جریان Stream Power Index	
1.04	8.88	0.00	-	شاخص ناهمواری سرزمین Terrain Ruggedness Index	
4.47	39.41	0.00	-	بافت Texture	
0.00	8.27	-12.38	-	شاخص موقعیت توپوگرافیک Topographic Position Index	
8.22	23.77	3.85	-	شاخص خیسگی توپوگرافی Topographic Wetness Index	
67.09	331.35	1.35	متر m	عمق دره Valley Depth	
45.06	543.91	0.00	متر m	فاصله عمودی تا شبکه آبراهها Vertical Distance to Channel Network	
1.28	2.01	1.04	-	شاخص رس Clay Index	مواد مادری
0.34	0.55	0.19	-	شاخص اندازه ذرات Grain Size Index	Parent material
0.25	0.75	0.11	-	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده NDVI	پوشش گیاهی یا موجودات زنده
0.17	0.55	0.09	-	شاخص پوشش گیاهی SAVI	Organism or Vegetation

نتایج و بحث

توزیع نرمال پیروی نمی‌کند. بنابراین برای نرمال نمودن داده‌های کربن آلی از تبدیل لگاریتمی استفاده شد (جدول ۱ و شکل ۳-ب). نیم‌تغییرنماهای تجربی شامل؛ مدل کروی، نمایی، گوسین، مدل دایره‌ای و کروی پنج‌بعدی بر داده‌های لگاریتمی کربن آلی برازش و بر اساس کم‌ترین جمع وزن‌دار مربعات خطای برازش، مدل دایره‌ای به‌عنوان بهترین مدل از

نقشه کریجینگ بلوکی: بررسی داده‌های کربن آلی خاک نشان می‌دهد که میانگین آن در منطقه مورد مطالعه ۱/۳۵ درصد و دامنه تغییرات آن از ۰/۴ درصد تا ۳/۵ درصد گسترده است (جدول ۱). هیستوگرام کربن آلی خاک (شکل ۳-الف) و آزمون آندرسون-دارلینگ (جدول ۲) نشان داد که داده کربن آلی از

نمونه‌برداری و پراکنش کربن آلی در منطقه مورد مطالعه، اندازه پیکسل مناسب برای تولید نقشه کریجینگ بلوکی 90×90 متر در نظر گرفته شد. این نقشه نشان می‌دهد کم‌ترین مقدار کربن آلی در اراضی کشاورزی و به‌ویژه در دیم‌زارها و بیش‌ترین مقدار در مراتع و اراضی جنگلی قابل مشاهده است (شکل ۳-د).

بین مدل‌های مورد بررسی انتخاب گردید (جدول ۲). مقادیر اثر قطعه‌ای، حد آستانه جزئی و دامنه تأثیر مدل دایره‌ای برازش‌شده بر داده‌های تغییرنما به ترتیب $0/057$ ، $0/092$ و $1566/5$ متر است (شکل ۳-ج و جدول ۳). سپس با استفاده از مدل تغییرنمای دایره‌ای، نقشه میان‌یابی کربن آلی خاک با استفاده از روش کریجینگ بلوکی تهیه گردید. با توجه به تراکم

جدول ۲- خلاصه آماری مقدار کربن آلی خاک در منطقه مطالعاتی.

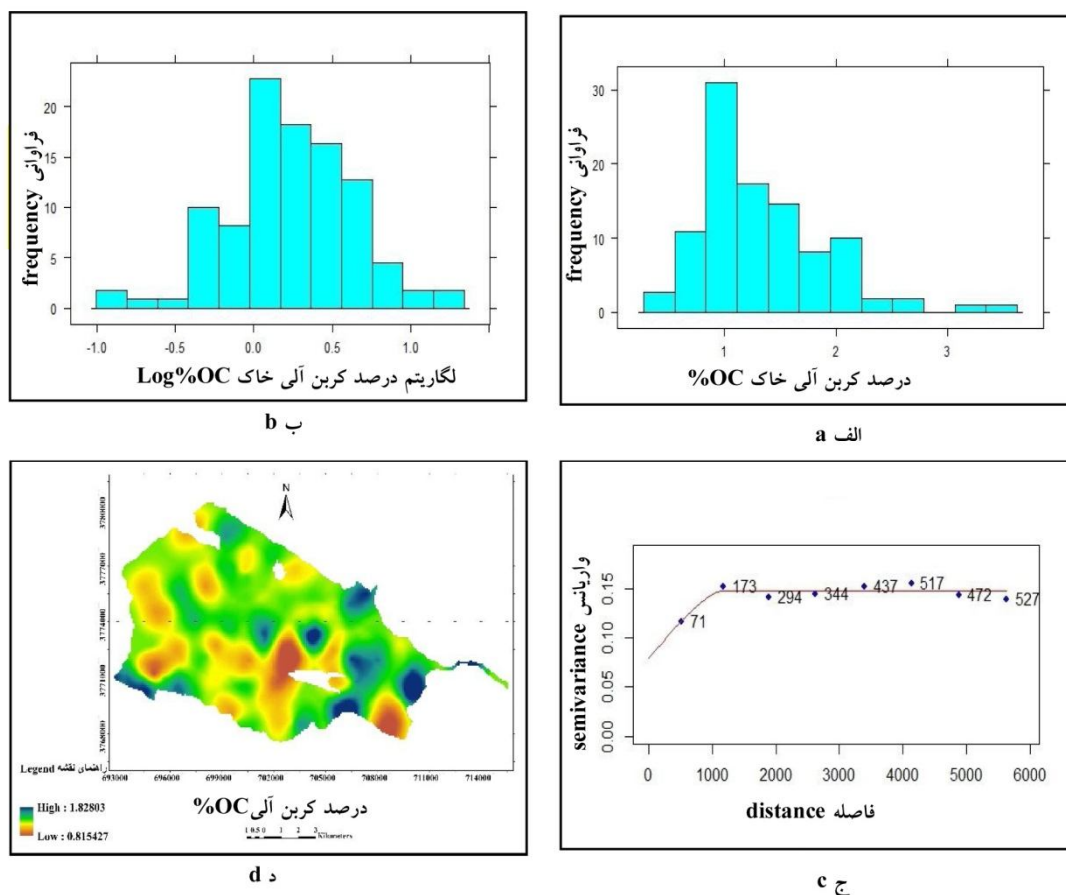
Table 2. Statistical parameters of soil organic carbon in study area.

متغیر Variable	واحد Unit	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Maximum	واریانس Variance	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	آزمون نرمال آندرسون-دارلینگ Anderson-Darling normality test p-value
کربن آلی OC	%	0.4	3.5	1.35	0.31	1.16	1.87	0.00
لگاریتم کربن آلی Log OC	Log%	-0.92	1.25	0.22	0.16	-0.10	0.34	0.13

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های برازش‌یافته بر نیم‌تغییرنمای تجربی.

Table 3. Parameters of fitted models on empirical variogram.

مدل Model	اثر قطعه‌ای Nugget effects	آستانه جزئی Partial sill	دامنه Range	جمع وزن‌دار مربعات خطای برازش مدل The weighted sum of squared errors of the fitted model
کروی Spherical	0.0589	0.0908	1747	8.62e-09
دایره‌ای Circular	0.0572	0.0922	1565	7.89e-09
نمایی Exponential	0.078	0.0731	600	1.263549e-08
گوسین Gaussian	0.0448	0.1053	871	1.337792e-08
کروی پنج‌بعدی Pentasppherical	0.0603	0.0895	2085	9.39199e-09

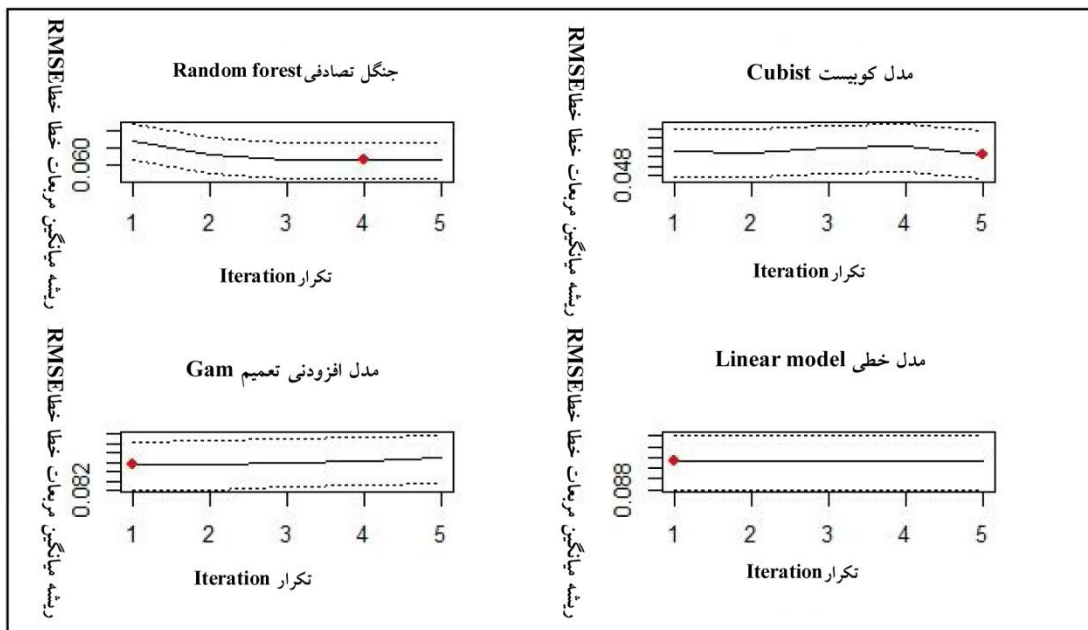


شکل ۳- الف) هیستوگرام کربن آلی خاک، ب) هیستوگرام لگاریتم کربن آلی خاک، ج) مدل دایره‌ای برازش‌یافته بر واریوگرام تجربی کربن آلی خاک، د) نقشه کریجینگ بلوکی کربن آلی خاک.

Figure 3. a) Histogram of soil organic carbon, b) Histogram of logarithm soil organic carbon, c) Circular model fitted on empirical variogram of soil organic carbon, d) Block kriging map of soil organic carbon.

مقادیر ۰/۰۹۳۲۱ و ۰/۰۸۷۳۱، ۰/۰۵۲۵۵، ۰/۰۶۱۳۷ دارای کم‌ترین مقدار ریشه مربعات خطا بوده‌اند. بنابراین می‌توان بیان کرد که مدل کویست با کم‌ترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا دارای بالاترین دقت و صحت درونی است. نقشه‌های ریزمقیاس‌شده با مدل‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

تولید نقشه‌های ریزمقیاس‌شده کربن آلی بر اساس چهار مدل رگرسیونی: برای اجرای الگوریتم دیزو از پارامترهای پیش‌فرض الگوریتم در نرم‌افزار، یعنی حداکثر ۱۰ تکرار و نمونه‌برداری از ۲/۵ درصد پیکسل‌های نقشه پایه استفاده گردید. شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی در تکرار ۴، کویست در تکرار ۵ و مدل تعمیم‌یافته افزودنی و مدل خطی چندمتغیره در تکرار ۱ به ترتیب با



شکل ۴- پارامترهای بهینه برای هر مدل پیش‌بینی.

Figure 4. Optimisation parameters for each predictive model.

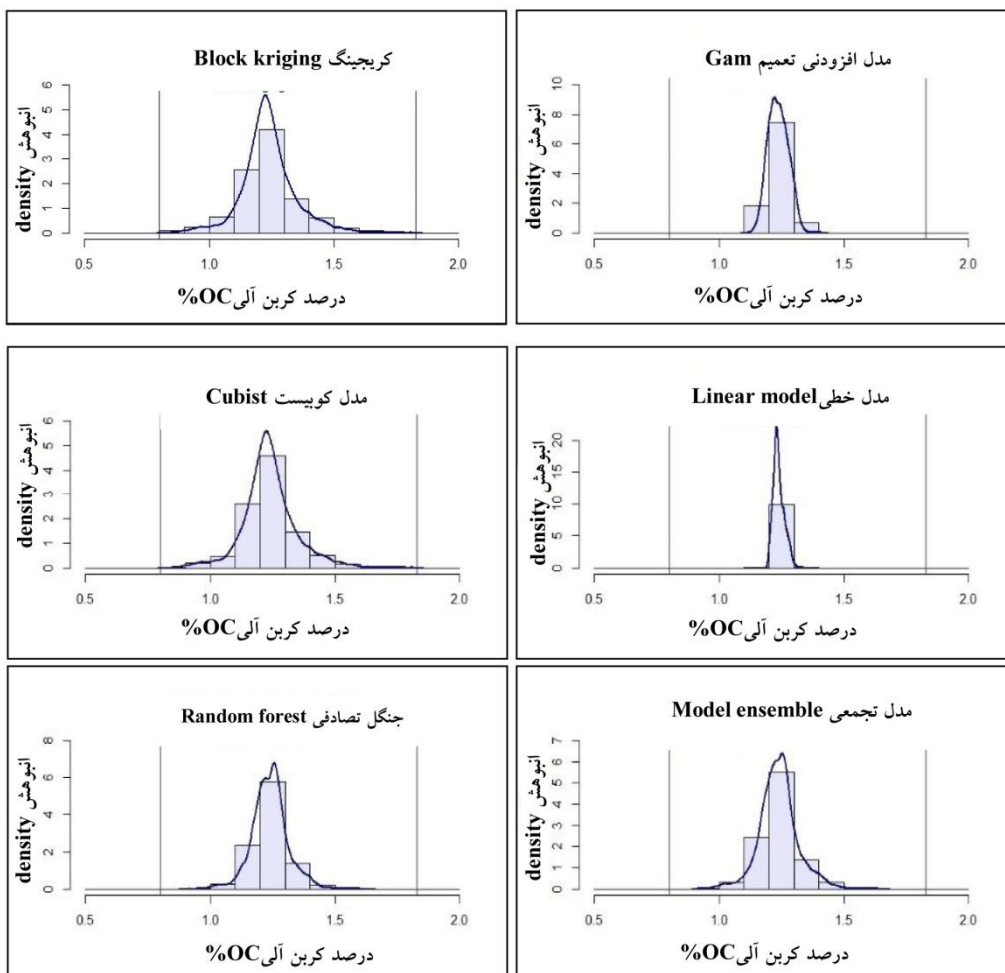
نقشه وزن‌دار شده بر اساس چهار مدل بیان شده است به دلیل تأثیر وزن بالاتر مدل‌های درختی به تابع تراکم احتمال نقشه پایه نزدیک‌تر است. اما تفاوت زیادی بین تابع تراکم احتمال نقشه‌های بازسازی حاصل از مدل‌های خطی چندمتغیره و مدل تعمیم‌یافته افزودنی و نقشه پایه مشاهده شد.

هم‌چنین، آماره D کولموگروف- اسمیرونوف برای مقایسه تابع توزیع تجمعی نقشه پایه با نقشه‌های بازسازی حاصل از مدل کویبست، جنگل تصادفی، مدل تجمعی، مدل تعمیم‌یافته افزودنی خطی و مدل خطی چندمتغیره به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۱۰۷، ۰/۱۱۸، ۰/۲۱۶ و ۰/۳۴۳ به دست آمد که نشان می‌دهد تابع توزیع تجمعی نقشه بازسازی شده حاصل از مدل کویبست نسبت به سایر مدل‌ها تشابه بیشتری به تابع توزیع تجمعی نقشه پایه دارد.

با توجه به مقدار کمینه، بیشینه، میانگین، چارک‌های اول و سوم و انحراف واریانس و چولگی کربن آلی بازسازی شده حاصل از مدل‌های مختلف (جدول ۴) و نقشه پایه کربن آلی (کریجینگ بلوکی)، تنها در مدل کویبست پارامترهای آماری (حداقل=۰/۸۱، حداکثر=۱/۸۲، میانگین= ۱/۲۳، انحراف معیار=۰/۱۰۶، چولگی=۱/۵۲) خیلی نزدیک به پارامترهای آماری نقشه پایه (حداقل=۰/۸۱، حداکثر=۱/۸۲، میانگین= ۱/۲۳، انحراف معیار=۰/۱۲، چولگی=۱/۶۴) است. تابع تراکم احتمال هر کدام از نقشه‌های بازسازی شده و نقشه پایه در شکل ۵ ارائه شده است. توابع تراکم احتمال نقشه‌های بازسازی در مدل کویبست و مدل جنگل تصادفی که مبتنی بر درخت هستند بسیار نزدیک به تابع تراکم احتمال نقشه پایه است. بعد از دو مدل مذکور، تابع تراکم احتمال نقشه‌های بازسازی مدل تجمعی که در واقع

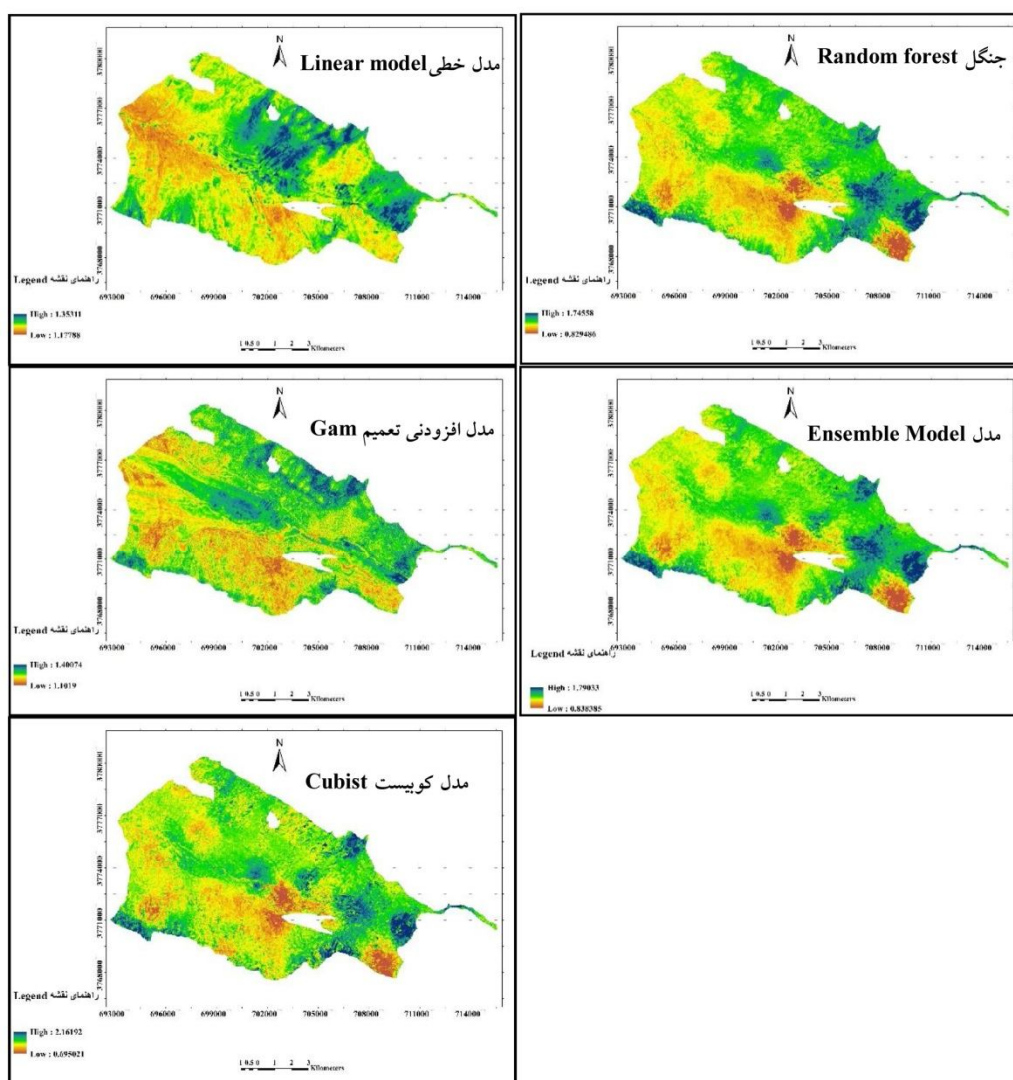
جدول ۴- پارامترهای آماری نقشه‌های کربن آلی پایه و بازسازی شده با استفاده از مدل‌های مختلف.

چولگی	انحراف استاندارد	حداکثر	چارک سوم	میانگین	چارک اول	حداقل	مدل
Skew	Std. Dev.	Max	0.75 pct.	Mean	0.25 pct.	Min	Model
1.52	0.1057	1.8253	1.2879	1.2315	1.1824	0.8155	کوبیست Cubist
1.37	0.0222	1.335	1.254	1.240	1.225	1.188	خطی Linear
1.17	0.0404	1.422	1.267	1.238	1.208	1.100	افزودنی تعمیم یافته Gam
1.32	0.0724	1.6397	1.2789	1.2402	1.1977	0.8946	جنگل تصادفی Random forest
1.37	0.0779	1.6608	1.2788	1.2396	1.1945	0.9112	مدل تجمعی Ensemble model
1.64	0.1226	1.8280	1.2926	1.2374	1.1705	0.8154	بلوک کریجینگ Block kriging



شکل ۵- توابع ترکم احتمال نقشه‌های کربن آلی پایه و بازسازی شده برای ناحیه مورد مطالعه، دامنه داده‌های نقشه پایه با استفاده از خطوط عمودی نشان داده شده است.

Figure 5. Probability density functions of the restored and base SOC maps. The range of map data is indicated using vertical lines.



شکل ۶- نقشه رقومی کربن آلی ریزمقیاس شده با استفاده از مدل‌های چندمتغیره خطی، افزودنی تعمیم یافته، کویست، جنگل تصادفی و مدل تجمعی.

Figure 6. Downscaled maps of soil organic carbon using multiple linear regression model, generalized additive model (gam) cubist, random forest and ensemble model.

ریزمقیاس سازی شده دارای ۱۵۶۴۸۸ پیکسل ۳۰×۳۰ متر بود. طبق پیش فرض الگوریتم اگر از ۰/۰۲۵ درصد این پیکسل‌ها برای اجرای الگوریتم دیزور و مدل‌های پیش‌بینی استفاده شود یعنی ۳۹۱۲ پیکسل در فرایند آموزش مدل‌های پیش‌بینی، شرکت داده شده است. حتی اگر ۲۰ درصد این پیکسل‌های آموزشی به‌عنوان نمونه‌های اعتبارسنجی در نظر گرفته شود. حدود ۷۸۲ پیکسل خواهیم داشت که اگر سه نمونه

نتایج اعتبارسنجی: اعتبارسنجی واقعی روش‌های ریزمقیاس سازی نیازمند این است که ما نمونه‌های خاک مرکب برای برآورد میانگین کربن آلی در درون محدوده پیکسل در تعداد معنی‌داری از موقعیت‌ها، برای نمایش تغییرات این میانگین‌ها و ارزیابی آن‌ها در کل ناحیه مورد مطالعه تهیه کنیم. هر نمونه خاک مرکب نیز نیازمند چندین نمونه خاک در هر پیکسل است (۱۱). در این پژوهش، خروجی نهایی نقشه‌های

مدل‌های مختلف داده‌کاوی بود نتیجه مذکور دور از انتظار نبوده و بنابراین دارای بالاترین کارایی در تولید نقشه ریزمقیاس‌سازی کربن آلی خاک نسبت به مدل‌های مختلف است.

رودیر و همکاران (۲۰۱۷) ریزمقیاس‌سازی نقشه ذخایر کربن آلی خاک را از قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر به ۹۰×۹۰ با روش دیزور اصلاح شده در منطقه ادگروی استرالیا اجرا نمودند بررسی آن‌ها نشان داد استفاده از مدل جنگل تصادفی و کویبست (ضریب تبیین به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۱) کارایی بیش‌تری داشته است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. اما در منطقه مسی نیوزلند در اجرای ریزمقیاس‌سازی نقشه ذخایر کربن آلی از مقیاس ۲۵۰×۲۵۰ متر به ۱۰×۱۰ متر، روش مدل افزودنی خطی تعمیم‌یافته با ضریب تبیین ۰/۹، بالاترین کارایی را داشت. که در مجموع می‌توان گفت کارایی مدل‌های رگرسیونی در اجرای الگوریتم دیزور، از منطقه‌ای به منطقه‌ای دیگر تغییر می‌کند.

خاک برای ایجاد نمونه مرکب در هر پیکسل در نظر گرفته شود نزدیک به ۲۳۴۷ نمونه خاک لازم است که بسیار پرهزینه و اجرای آن در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک غیرممکن خواهد بود. بنابراین در این مطالعه از مقایسه نقشه بازسازی‌شده با نقشه پایه به منظور اعتبارسنجی نتایج و بررسی فرض توازن جرم استفاده شد و معیارهای ارزیابی نارایی، ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی تطابق انتخاب گردیدند. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد از میان مدل‌های داده‌کاوی بررسی‌شده مدل کویبست با ضریب تبیین (۰/۷۵) ضریب همبستگی تطابق بازسازی (۰/۸۶) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای (۰/۶۱) کارایی بیش‌تری دارد (جدول ۵). هم‌چنین نقشه ریزمقیاس بازسازی‌شده با استفاده از مدل تجمعی دارای بیش‌ترین ضریب تبیین (۰/۷۸) و ضریب همبستگی تطابق بازسازی (۰/۸۶) و کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطای (۰/۰۶) بوده است. با توجه به این‌که مدل تجمعی، حاصل وزن‌دهی

جدول ۵- معیارهای ارزیابی نقشه‌های بازسازی‌شده حاصل از مدل‌های مختلف با نقشه پایه.

Table 5. Evaluation criteria restored maps with base map.

مدل Model	اریب Bias	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	ضریب همبستگی تطابق Concordance	ضریب تبیین R ²
مدل تجمعی Ensemble model	0.002	0.0655	0.8572	0.7756
کویبست Cubist	0.001	0.06118	0.7967	0.7514
جنگل تصادفی Random forest	0.003	0.0734	0.7349	0.7050
افزودنی تعمیم‌یافته Gam	0.001	0.1081	0.2991	0.2538
خطی Linear	0.003	0.1174	0.1129	0.1040

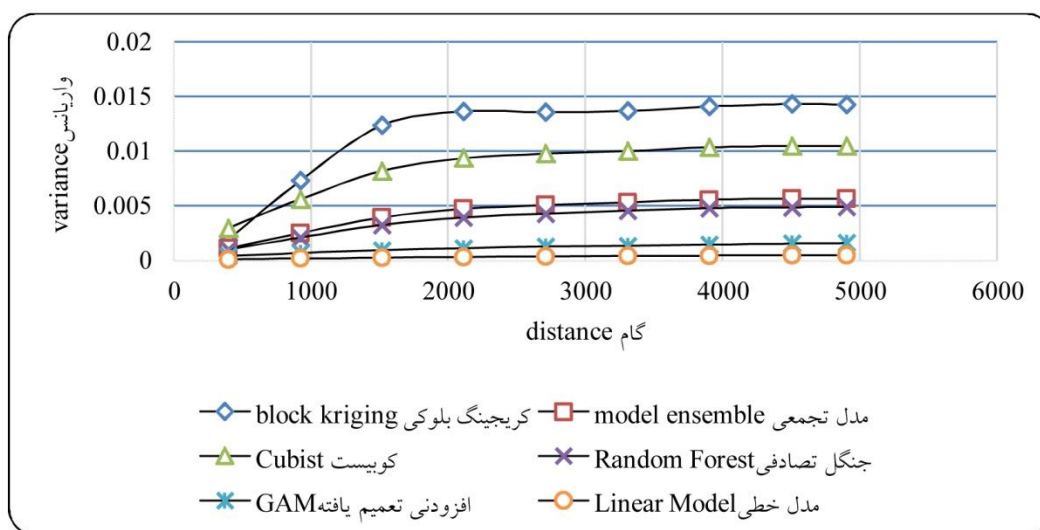
تعمیم یافته مدل نمایی و برای نقشه پایه، مدل گوسین است. به طور کلی می توان گفت که واریانس نیم تغییرنما در نقشه حاصل از مدل کوبیست (مقدار آستانه کل = ۰/۰۱) نسبت به مدل های دیگر، بسیار نزدیک تر به نقشه پایه (مقدار آستانه کل = ۰/۰۱۴) است، این نتیجه بیان می کند که روش داده کاوی کوبیست توانسته است واریانس نقشه پایه را به خوبی در نقشه ریزمقیاس شده نشان دهد. با توجه به مقادیر دامنه تغییرنماها می توان گفت هیچ کدام از روش های داده کاوی نتوانسته اند تغییرات کوتاه دامنه موجود در نقشه پایه مدل سازی کنند.

نیم تغییرنمای تجربی و مدل های برازش یافته بر داده های ریزمقیاس سازی بازسازی شده و نقشه پایه برای تعیین ساختار مکانی کربن آلی خاک در شکل ۷ نمایش داده شده است و پارامترهای اثر قطعه ای، دامنه و آستانه جزئی برای هر مدل تغییرنما نیز در جدول ۶ ارائه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود داده های نقشه های بازی سازی شده مدل های درختی رگ سیونی کوبیست و جنگل تصادفی و مدل تجمعی دارای مدل تغییرنمای مشابه کروی پنج بعدی هستند و بهترین مدل برازش یافته بر داده های نقشه های بازی سازی، مدل های خطی چندمتغیره و افزودنی

جدول ۶- پارامترها و مدل های تغییرنما نقشه های بازسازی شده و نقشه پایه.

Table 6. Parameters and Variogram models of restore maps along with the base map.

دامنه Range	آستانه جزئی Partial sill	اثر قطعه ای Nugget	مدل واریوگرام Variogram model	مدل model
3552.16	0.00543	0.00	Pentaspheical	مدل تجمعی Ensemble model
3108.55	0.00933	0.0008	Pentaspheical	کوبیست Cubist
3859.25	0.0046	0.0001	Pentaspheical	جنگل تصادفی Raodm forest
2231.72	0.0016	0.0002	Exponential	افزودنی تعمیم یافته Gam
3450.02	6.0086e-04	5.396e-05	Exponential	خطی Linear
1051.25	0.0139	0.00	Gaussian	نقشه پایه Base map (block kriging)



شکل ۷- مقایسه نیم‌تغییرنمای نقشه‌های بازسازی شده با نقشه پایه.

Figure 7. Comparison of the semi-variograms of the restored maps with the base map.

از نقشه‌های رقومی در مقیاس منطقه‌ای و ملی از لحاظ اقتصادی و زمان اجرا به صرفه خواهد بود. نقشه‌های کربن آلی خاک تهیه شده با این روش که می‌توان گفت در مقیاس مزرعه‌ای تولید شده‌اند، با نمایش مناطق مسأله‌دار این امکان را به مدیران بخش کشاورزی می‌دهد تا در اراضی کشاورزی به‌گونه‌ای اعمال مدیریت نمایند که مقدار کربن آلی خاک در حد آستانه $1/2$ تا $1/5$ درصد در منطقه ریشه (۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متری) باقی بماند. هم‌چنین تعیین ذخایر کربن آلی خاک با استفاده از داده‌های این نقشه‌ها با دقت زیاد امکان‌پذیر می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد الگوریتم دیزور اصلاح‌شده به‌دلیل استفاده از روش‌های مختلف داده‌کاوی و امکان انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی و امکان استفاده از مدل تجمعی، گزینه خوبی برای ریزمقیاس‌سازی نقشه خصوصیات کمی خاک می‌باشد. بنابراین، در شرایط کشور ایران که معمولاً داده‌های مشاهداتی مختصات‌دار خاک دارای پراکنش نامناسب است و در حقیقت، بیش‌تر نقشه‌های رقومی ویژگی‌های خاک حاصل، دارای اندازه پیکسل خروجی درشت هستند؛ استفاده از این روش برای تولید نقشه‌های خصوصیات خاک در مقیاس مزرعه‌ای

منابع

- Gallant, J.C., and Dowling, T.I. 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resource Research*. 39: 1347-1359.
- Grunwald, S., Thampson, J.A., and Boettinger, J.L. 2011. Digital soil mapping and modeling at continental scales: finding solutions global issues. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 75: 1201-1213.
- Fatehi, Sh. 2008. Semi-detailed soil survey of Merek plain in Kharkeh river basin. *Soil and Water Research Institute*. 87p. (In Persian)
- Fatehi, Sh., Mohammadi, J., Salehi, M.H., Momeni, A., Toomanian, N., and Jafari, A. 2016. Downscaling Digital Soil Organic Carbon Map. *J. Water Soil*. 30: 4. 1142-1157. (In Persian)

5. Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*. 32: 1283-1298.
6. Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
7. Hijmans, R.J. 2015. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R Package Version 2.3-40. (<http://CRAN.R-project.org/package=raster>).
8. Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications, New York, 281p.
9. Kempen, B., Brus, D.J., Heuvelink, G.B.M., and Stoorvogel, J.J. 2009. Updating the 1:50000 Dutch soil map using legacy soil data: a multinomial logistic regression approach. *Geoderma*. 151: 311-326.
10. Kuhn, M., Wing, J., Weston, S., Williams, A., Keefer, C., Engelhardt, A., Cooper, T., Mayer, Z., Kenkel, B., Team, T.R.C., Benesty, M., Lescarbeau, R., Ziem, A., Scrucca, L., Tang, Y., and Candan, C. 2016. Caret: Classification and Regression Training. R Package Version 6.0-64. (<https://CRAN.R-project.org/package=caret>).
11. Lagacherie, P., Bailly, J.S., Monestiez, P., and Gomez, C. 2012. Using scattered hyperspectral imagery data to map the soil properties of a region. *Europ. J. Soil Sci.* 63: 110-119.
12. Lal, R. 2014. Soil Carbon Management and Climate Change. *Carbon Management*. 4: 439-462.
13. Lin, A. 1989. Concordance correlation-coefficient to evaluate reproducibility. *Biometrics*. 45: 255-268.
14. McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117: 3-52.
15. Malone, B.P., McBratney, A.B., Minasny B., and Wheeler, I. 2012. General method for downscaling earth resource information. *Computers and Geosciences*. 41: 119-125.
16. Malone, B.P., McBratney, A.B., and Minasny, B. 2013. Spatial scaling for digital soil mapping. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 77: 890-902.
17. Malone, B.P., Styc, Q., Minasny, B., and McBratney, A.B. 2017. Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale: A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data. *Geoderma*. 290: 91-99.
18. Minasny, B., and McBratney, A.B. 2010. Methodologies for Global Soil Mapping. P 429-437. In: J.L. Boettinger, D.W. Howell, A.C. Moore, A.E. Hartemink, and S. Kienast-Brown (eds.) *Digital Soil Mapping: Bridging Research Environmental Application and Operation Progress in Soil Science*. Springer Netherlands.
19. Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*. 5: 3-30.
20. Padarian, J., Minasny, B., and McBratney, A.B. 2014. The evolving methodology for global soil mapping. P 215-220. In: D. Arrouays, N. McKenzie, J. Hempel, A. Richer de Forges, A.B. McBratney, (eds.), *Global Soil Map: Basis of the Global Spatial Soil Information System*. CRC Press.
21. Pebesma, E. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computer and Geoscience*. 30: 683-691.
22. Pelletier, J.D. 2008. *Quantitative Modeling of Earth Surface Processes*. Cambridge. 295p.
23. R Core Team, 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria URL. <http://www.R-project.org/>.
24. Riley, S.J., DeGloria, S.D., and Elliot, R., 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermount. J. Sci.* 5: 23-27.
25. Roudier, P., Malone, B.P., Hedley, C.B., Minasny, B., and McBratney, A.B. 2017. Comparison of regression methods for spatial downscaling of soil organic carbon stocks maps. *Computers and Electronics in Agriculture*. 142: 91-100.

26. SAGA Development Team. 2011. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA). (Available at <http://www.saga-gis.org/en/index.html>, verified 28 October 2014).
27. Smith, M.P., Zhu, A.X., Burt, J.E., and Stiles, C. 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma*. 137: 1. 58-69.
28. 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 and Remote Sensing*. 63: 87-93.
29. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
30. 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.



Spatial downscaling of digital soil organic carbon map using Dissever algorithm

***Sh. Fatehi¹, K. Eftekhari² and J. Ghaderi¹**

¹Research Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran,

²Research Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agriculture Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 07.17.2019; Accepted: 04.26.2020

Abstract

Background and Objectives: In most national and regional projects, in order to produce a digital map of soil properties, usually sampling density is low due to costly and time-consuming. Because of this, produced digital maps have a large spatial resolution (more than 90 meters) that can't be used on a farm scale (spatial resolution less than 30 meters). One way to solve this problem is to downscale of digital maps with coarse spatial resolution using covariates with fine spatial resolution. The purpose of this study was to investigate the efficiency of the Dissever algorithm for producing an organic carbon map with a spatial resolution of 30 m from a carbon-organic digital map with a spatial resolution of 90 meters.

Materials and Methods: The study area is approximately 14084 hectares and formed a small part of the Karkhe catchment in Kermanshah province. Initially, using 110 random observations and block Kriging method, an organic carbon map was prepared with a pixel size of 90 m. Then a set of 23 environmental covariates associated with scorpan factors including climate, topography, living organisms and maternal materials were used as predictor variables. SRTM digital elevation model and Landsat 5 satellite imagery were used to provide climatic and topographic predictors and vegetation and geology indicators. The dissever algorithm is a repetitive process for approaching a mass balance solution. Multiple regression model, generalized additive model, cubist, random forest, and ensemble model used for production fine spatial resolution map. In order to evaluate the efficiency of different methods, restored maps (obtained by converting downscaled maps with 30 m resolution to maps with 90 m resolution using mean filter) were compared with base map (block kriging map) using validation criteria include Bias, R^2 , root mean square error, and concordance correlation coefficient. The spatial structure of the restored maps and the base map was also investigated using parameters of their experimental variogram.

Results: The relationship between the covariates and the soil organic carbon using data mining methods in the framework of dissever algorithm resulted in the production of downscaled maps. The results showed that the probability density function of the restored map of cubist model is very close to the base map probability density function. Also, the downscaled map using the cubist model had the highest coefficient of determination (0.75) and concordance correlation coefficient (0.8) and the lowest root mean square error (0.06) and bias (0.001). Thus, cubist model have the highest efficiency of downscaling in compared to the rest of models. . It was also found that the use of ensemble model increases the accuracy and precision of downscaled map compared to single data mining models. The study on the spatial structure of restored maps indicates that the cubist restored maps captured more of the variance of the base map than others.

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

Conclusion: The modified diserver procedure due to the use of data mining methods and ensemble model is a practical option to downscale soil properties map with coarse resolution. Considering the high efficiency of diserver algorithm, this method can be used to prepare soil properties map at field scale from national and regional maps which can be used in farm management.

Keywords: Block kriging, Data mining, Soil digital mapping, Spatial resolution

