مقاله پژوهشی

مدلسازی پراکنش ماده آلی خاک با استفاده از سنجش از دور و مدل جنگل تصادفی و کریجینگ در شهرستان لنجان

فاطمه شیرانی تبار [۱] و مژگان احمدی ندوشن [۲*]

۱) دانشجوی کارشناس ارشد آلودگی محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
۲) استادیار، گروه محیط زیست، مرکز تحقیقات پسماند و پساب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: m.ahmadi@khuisf.ac.ir, m.ahmadi1984@gmail.com

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال دوازدهم
شماره دو (٤٦)
زمستان ۱۴۰۱

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۷/۲۵

صفحات: ۱۴۷-۱۳۳

چکیده:

زمینه و هدف: خاک یکی از منابع طبیعی بسیار مهم است که تامین بیش از ۹۷ درصد نیازهای غذایی بشر را به عهده دارد. ماده آلی خاک یکی از فاکتورهای مهم کیفی خاک است که بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تاثیر زیادی دارد. مدلسازی و تهیه نقشه ویژگی‌های خاک برای بسیاری از کاربردهای محیطزیستی، اقلیمی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی ضروری است. هدف این مطالعه مدل‌سازی پراکنش ماده آلی و کربن آلی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲ و مدل جنگل تصادفی و کریجینگ در شهرستان لنجان است.

روش پژوهش: در این مطالعه ، نقشه‌های رقومی چهار پارامتر اصلی خاک شامل کربن آلی خاک، مواد آلی خاک، هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک با استفاده از روش جنگل تصادفی و کریجینگ در محدوده شهرستان لنجان تهیه شد. براساس واحدهای زمینی همگن، در مجموع ۱۱۰ نقطه در محدوده منطقه مورد مطالعه تعیین و از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری سطح خاک در این نقاط اقدام به نمونه برداری شد. نمونه برداری در تیرماه ۱۴۰۰ انجام گرفته و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ نیز از همین ماه دریافت شد زیرا در این ماه به علت ابر کمتر و افزایش بازتاب مستقیم از سطح خاک، اطلاعات بهتری دسترس قرار می گیرد. به علاوه از ۱۶ متغیر محیطی تاثیرگذار بر پراکنش پارامترهای خاک استفاده شد. متغیرهای کمکی مختلف از جمله NDVI، NDWI، DEM، Slope که همگی به صورت مستقیم یا غیر مستقیم از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده بود برای پیش بینی استفاده شد.

یافته‌ها: نقشه‌های به دست آمده از روش جنگل تصادفی از صحت بسیار بهتری نسبت به روش کریجینگ برخوردار بوده است. نقشه‌ی پهنه‌بندی تهیه شده با استفاده از روش جنگل تصادفی جزئیات بسیار بیشتری را نسبت به نقشه کریجینگ نمایش می‌دهد. خروجی مدل جنگل تصادفی با ترکیب متغیرهای کمکی مختلف به ترتیب مقادیری معادل ۰/۳۱۲، ۰/۵۴، ۰/۷۳و ۰/۱۶ از خطای مدل‌سازی کربن آلی، مواد آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک را نشان داد. در منطقه مورد مطالعه، مقادیر بیشینه کربن آلی و مواد آلی خاک در کاربری شهری و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک در زمین‌های کشاورزی مشاهده شد. مهم‌ترین متغیرهای موثر بر توزیع فضایی کربن آلی و مواد آلی خاک clay، slope و silt بودند. در حالی که در مدل‌سازی هدایت الکتریکی، silt، BI و Aspect و در مدل سازی اسیدیته متغیرهای MNDWI، NDWI و DEM مهم‌تر از سایر متغیرها ثبت شدند.

نتایج: به طور کلی این مطالعه نشان داد که مدل‌های رگرسیون کاربری اراضی براساس روش جنگل تصادفی می‌تواند به ترسیم سریع‌تر و کارآمدتر پارامترهای خاک کمک کند. نیاز به روش‌های کارآمد و دقیق، از جمله رگرسیون کاربری اراضی، برای نظارت مستمر بر تغییرات کیفیت خاک در سیماهای سرزمین‌های مختلف به شدت وجود دارد. رگرسیون کاربری اراضی می‌تواند به توسعه نقشه‌های پیشرفته پارامترهای کیفیت خاک با استفاده از اطلاعات مکانی مقرون به صرفه و در دسترس کمک کند.

کلید واژه‌ها: کریجینگ، رگرسیون کاربری اراضی، مدل جنگل تصادفی، تصاویر ماهواره ای سنتینل-۲ ، کربن آلی خاک

10.30495/WSRCJ.2022.66981.11297

مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی بسیار مهم است که تامین بیش از ۹۷ درصد نیازهای غذایی بشر را به عهده دارد. خاک بزرگترین مخزن ذخیره کربن می‌باشد. دخالت‌های انسان در طبیعت، طی سال‌های گذشته از قبیل فعالیت‌های نامناسب کشاورزی، جنگل تراشی و چرای بیش از حد، سبب بروز اثرات نامطلوب بر کیفیت خاک و محیط زیست شده است (Ghafari et al., 2020). خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک که بیش از ۸۰ درصد زمین های کشاورزی را دربرمی‌گیرند از لحاظ ماده آلی فقیر بوده، لذا برای بهبود حاصلخیزی این خاک‌ها، افزودن مواد آلی به آن‌ها ضروری است. امروزه با توجه به اهمیت کشاورزی پایدار به عنوان مجموعه‌ای از تفکرات و روش ها برای رفع نیاز فعلی و حفظ منابع جهت تامین نیاز نسل بعدی، استفاده از کودهای آلی به عنوان یکی از ارکان اصلی کشاورزی پایدار ضروری می‌باشد (Javanmard et al., 2015). با توجه به حاصلخیزی خاک و بهره وری پایدار محصولات کشاورزی، مواد آلی در خاک عملکرد بهتری نسبت به کودهای مصنوعی در خاک دارند. کودهای آلی کلیدی برای افزایش کیفیت خاک و عملکرد بیشتر محصول در اکوسیستم‌های کشاورزی می باشند که ورودی‌های آن‌ها برای سلامت محیط زیست کشاورزی مفید است (Mohkum Hammad et al., 2020). ماده آلی، از مهم ترین اجزا تشکیل دهنده خاک است و بسیاری از کارکردهای خاک به عنوان یک سیستم زنده به این جز بستگی دارد (Noor and Mirnia, 2009). ماده آلی نقش مهمی در خصوصیات بیولوژیکی (فراهمی اجزا و مواد غذایی مورد نیاز جمعیت میکروبی خاک)، ویژگی‌های شیمیایی (تغییرات pH و قدرت بافری خاک) و فیزیکی خاک (پایداری ساختمان خاک) دارد و تاثیر قابل توجهی روی برهم‌کنش‌های خاک و گیاه می‌گذارد (Noshadi et al., 2014). کربن آلی خاک از خصوصیات مهم خاک محسوب می‌شود که بسیاری از فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو لازم است که پویایی ماده آلی در خاک مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان پاسخ خاک در برابر تغییرات محیطی را شبیه سازی کرد. بنابراین برای بهبود تعیین مقدار کربن آلی خاک و مدلسازی تغییرات مکانی آن، نیاز به روش‌های بررسی توزیع مکانی قابل اعتماد است (Fathololoumi et al., 2020). کربن آلی خاک برای عملکرد طبیعی اکوسیستم‌ها ضروری است. همچنین نقش مهمی در دینامیک جهانی کربن و مطالعه تغییرات آب و هوایی ایفا می‌کند زیرا بزرگترین مخزن کربن کل اکوسیستم‌های زمینی است. بطور کلی توزیع مکانی کربن آلی خاک تحت تاثیر عوامل اقلیمی، ژئومورفولوژیکی، سنگ شناسی و کاربری زمین است (Sodango et al., 2021). تحقیقات اخیر نشان داده است که سنجش از دور منبع کلیدی داده‌ها برای نقشه برداری خاک است. تحقیقات خاک برای دهه‌های متوالی نشان داد که ایجاد یک رابطه خطی بین داده‌های سنجش از دور و کربن آلی خاک امکان پذیر است (Malik et al., 2020). همچنین شناسایی ویژگی‌های توزیع فضایی کربن آلی خاک به بررسی نقش کربن در کشاورزی و چرخه اکوسیستم کربن کمک می کند. نقشه برداری دیجیتالی خاک با کمک عوامل تشکیل دهنده خاک مانند عوامل زمینی، آب و هوایی و پوشش گیاهی می‌تواند به طور مداوم توزیع فضایی کربن آلی خاک را ترسیم کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). نقشه‌های کربن آلی خاک به روزهنگام، برای درک تنوع مکانی کربن آلی خاک ضروری هستند که می‌تواند به ما در حفظ کیفیت خاک کمک کند و اقداماتی را برای کاهش تغییرات جهانی آب و هوا انجام دهد. گرفتن نمونه‌های خاک از تجزیه و تحلیل تعداد زیادی نقطه و سپس انجام پیش بینی‌های کربن آلی خاک در مناطق بزرگ بسیار مشکل و پرهزینه است. نقشه‌های کربن آلی خاک به روز هنگام، برای درک تنوع مکانی کربن آلی خاک ضروری هستند که می‌تواند به ما در حفظ کیفیت خاک کمک کند و اقداماتی را برای کاهش تغییرات جهانی آب و هوا انجام دهد. گرفتن نمونه‌های خاک از تجزیه و

تحلیل تعداد زیادی نقطه و سپس انجام پیش‌بینی‌های کربن آلی خاک در مناطق بزرگ بسیار مشکل و پرهزینه است. نقشه برداری رقومی خاک از طرف دیگر یکی از راه های کاهش هزینه‌های نمونه برداری و تجزیه و تحلیل برای پیش‌بینی خصوصیات خاک و مقوله‌های بزرگ از نمونه‌های گسسته است (Zhou et al., 2020). گرچه مطالعات زیادی در مورد ایجاد مدل‌های پیش بینی موادآلی خاک و تهیه نقشه توزیع مکانی آن صورت گرفته است ولی همچنان ایجاد یک نقشه دقیق از پراکنش مواد آلی خاک به دلیل دشواری در انتخاب داده‌های ماهواره ای دقیق و روش‌های پیش بینی برای یک منطقه خاص چالش برانگیز است.با توسعه سریع سنجش از دور، روش‌های پیش بینی مواد آلی خاک براساس داده‌های سنجش از دور ماهواره ای پیشرفت قابل توجهی داشته است. مدل‌های پیش بینی ماده ی آلی، روش‌های آماری گوناگون را با متغیرهای پیش بینی کننده که رابطه نزدیکی با میزان ماده آلی خاک دارند، تلفیق می‌کنند مانند تلفیق داده‌های سنجش از دور با داده‌های توپوگرافیکی (Zhang et al., 2021). روش‌های گوناگون در فن‌آوری نقشه‌برداری رقومی از جمله رگرسیون چندگانه خطی ، کریجینگ و مدل جنگل تصادفی برای تخمین خصوصیات گوناگون خاک استفاده شده است. مدل جنگل تصادفی یک فن یادگیری محبوب است که در تحلیل سنجش‌ازدور مورد استفاده قرار می‌گیرد و اهمیت متغیرها در مدلسازی را نیز تعیین می‌کند (Sadeghi and Ahmadi Nadoushan, 2021). تغییر نما یا واریوگرام یکی از مهمترین ابزارهای زمین آمار به منظور بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک است. روش کریجینگ با استفاده از خصوصیات ساختاری تغییرنما و مقادیر داده‌های اولیه از پارامترهای مورد بررسی، تخمین‌های بهینه و نااریب از متغیرها در مکان هایی که نمونه برداری انجام نشده است ارائه می‌دهد (Kettler et al., 2001).

در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در براورد کربن آلی خاک انجام گرفته است که برخی از آنها بدین شرح است. فتح العلومی و همکاران (۱۳۹۹) از مدل جنگل تصادفی برای مدل سازی و برآورد کربن آلی خاک استفاده کردند و مدل سازی کربن آلی خاک را در ۳حالت استفاده از ۱) متغیرهای بدست آمده از DEM، ۲) متغیرهای مستخرج از تصاویر ماهواره ای و ۳) ترکیب متغیرهای بدست آمده از DEM و سنجش از دور انجام دادند. ملیک[1] و همکاران (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای با هدف استفاده از سنجش از دور برای ارائه یک روش قابل اعتماد برای پیش بینی کربن آلی خاک انجام داد. از روش رگرسیون کریجینگ استفاده شد و عملکرد آن در مقایسه با شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ از سایر روش‌ها بهتر عمل کرد. در این مطالعه، هدف استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و آنالیز آزمایشگاهی در تخمین کربن آلی خاک و استفاده از مدل جنگل تصادفی به منظور بررسی متغیرهای تاثیرگذار بر میزان ماده آلی و کربن آلی خاک است. لایه‌های اطلاعاتی از جمله خصوصیات توپوگرافی و شاخص‌های طیفی استخراج یافته با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به همراه مقادیر کربن آلی محاسبه شده از ۱۱۰ نمونه خاک به عنوان ورودی‌های مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان لنجان یکی از مناطق مستعد و فعال بخش کشاورزی در استان اصفهان است که با داشتن پتانسیل، منابع و جاذبه‌های گردشگری کشاورزی: از جمله باغات گردو، بادام، هلو و سایر میوه‌های دانه‌دار و هسته‌دار، شالیزارهای برنج، مزارع گندم، جو و.... در صورت توجه و برنامه ریزی‌های مناسب جهت افزایش آگاهی، آموزش کشاورزی و گردشگران، ارتقای زیرساخت‌ها، امکانات و خدمات رفاهی ظرفیت لازم برای گسترش گردشگری کشاورزی و استفاده از مزایای آن دارد. محدوده مورد مطالعه شهرستان لنجان در استان اصفهان و در

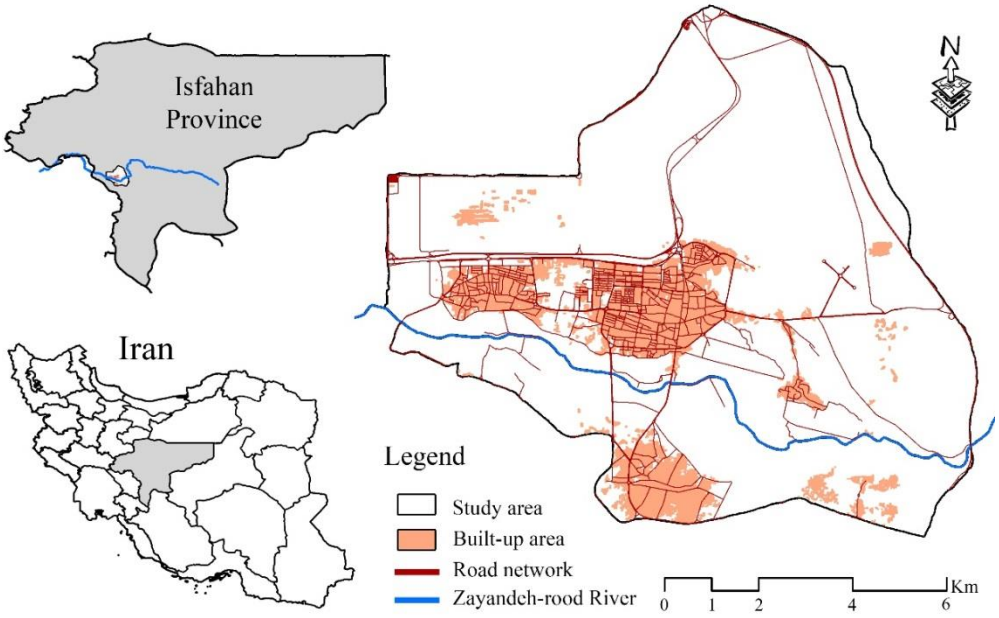
[1] Malik

۳۵کیلومتری جنوب غربی شهر اصفهان است که از شمال به شهرستان نجف آباد، از شرق به شهرستان‌های مبارکه و فلاورجان و از جنوب و غرب به استان چهارمحال و بختیاری محدود می‌شود. این شهرستان در ۵۰درجه و ۵۶دقیقه تا ۵۱دقیقه و ۲۸دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲درجه و ۱۱دقیقه تا ۳۲درجه و ۳۱دقیقه عرض شمالی قرار دارد و دارای ۵ دهستان، ۹شهر و ۵۳ روستای دارای سکنه است (Norouzi and Fathi, 2018). همچنین براساس کشت و زراعت وسیع، نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه که به رودخانه نزدیکترند در طبقه با پوشش گیاهی زیاد و بخش‌هایی که کشت در منطقه‌ای کوچک و مجاورت زمین بایر است یا درختان با فاصله، دست کاشت شده‌اند، پوشش گیاهی متوسط و قسمت‌های فاقد کشت، در طبقه باید دسته بندی شده‌اند. بطور متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۴+ درجه سانتی گراد و متوسط میزان بارندگی سالیانه آن ۱۱۵میلی متر است (Sadeghi and Ahmadi Nadoushan, 2021). شکل ۱ نقشه منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد.

روش کار

نمونه برداری و محاسبه هدایت الکتریکی

در مجموع ۱۱۰ نمونه خاک از لایه ۳۰-۰ سانتی متری خاک با استفاده از بیل و بیلچه جمع آوری گردید. نمونه‌های خاک از ۵ نقطه، یکی در مرکز و چهار نقطه‌ی دیگر به طور مساوی در فاصله‌ی ۰/۵ متری از مرکز و حدود ۷۰ سانتی متری از یکدیگر جمع آوری و سپس ترکیب شدند. نمونه‌ها با زیرورو شدن و خرد شدن روزانه در دمای اتاق (۲۵درجه سانتی گراد) خشک شدند. سپس از یک مش ۲میلی متر عبور داده شده و به آزمایشگاه منتقل گردیدند. روش والکی-بلک یک تیتراسیون برگشتی است که در آن کربن آلی در مجاورت با اسید سولفوریک اکسیده می‌شود و سپس باقی مانده بی کرومات با فروآمونیوم سولفات تیتر می‌گردد. پس از اندازه گیری کربن آلی با ضرب کردن مقدار حاصل در ضریب ۱/۷۲۴ مقدار ماده آلی محاسبه می‌شود. از آنجا که این ضریب در خاک‌های مناطق مختلف ثابت نبوده و تغییر می‌کند و از سوی دیگر ضرب شدن یک ضرب ثابت در یکی از متغیرهای رابطه رگرسیون تاثیری در دقت رابطه نخواهد داشت، مقدار کربن آلی به جای مقدار ماده آلی در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت (Noshadi et al., 2014). کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی، هدایت الکتریکی و pH در نسبت‌های ۲:۱خاک به آب به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های هدایت سنج و pH متر اندازه گیری شد (Fahmideh et al., 2019).



شکل ۱. نقشه منطقه موردمطالعه

هدایت الکتریکی ۲۵درجه سانتی گراد با ضریب تصحیح الکترود و تصحیح دمایی و استاندارد هدایت سنج مدل متراهم محاسبه شد. همچنین pH با اختلاط ۱به۲ خاک فرآوری شده و آب مقطر با pH متر مدل متراهم اندازه گیری و یادداشت شد (Page et al., 1992).

تولید لایه‌های توپوگرافی و شاخص‌های ماهواره‌ای

از شاخص‌های طیفی و توپوگرافی برای تولید ورودی مدل‌های تخمینی کربن و ماده آلی خاک استفاده شد. برای استخراج اطلاعات صحیح از تصویر ماهواره‌ای، نیاز به پیش پردازش آن بود. در مرحله پیش پردازش، خطاهای موجود بر روی داده‌های خام از قبیل خطاهای رادیومتری واتمسفری تصحیح گردید. در پژوهش حاضر به منظور بررسی کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در برآورد کربن آلی خاک و نیز استخراج معادله‌های رگرسیونی، از تصاویر ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد. سنتینل-۲، با دوره بازگشت ۵ روزه دارای ۱۳باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه با توان تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰و ۶۰متری می‌باشد (Pandi et al., 2020).

در کل، از ۱۶متغیر محیطی تاثیرگذار بر پراکنش پارامترهای خاک مورد بررسی، استفاده شد. تمامی متغیرهای مورد استفاده به شکل مستقیم (مانندNDVI، NDWI، MSAVI و...) و غیر مستقیم (Slope، Aspect، TWI) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (سنتینل-۲ و آلوس) محاسبه و در اندازه پیکسل ۱۰متر تنظیم شدند (شکل۱). نقشه‌های شاخص‌های ماهواره‌ای با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاعی و نرم افزار ArcGIS 10.5 تولید شد. همچنین به منظور پهنه‌بندی پارامترهای اندازه گیری شده از دو روش جنگل تصادفی و کریجینگ استفاده شده است. جهت جلوگیری از خطای بیش برازش در نقشه سازی به روش جنگل تصادفی، در ابتدا اقدام به بررسی همبستگی غیرخطی با استفاده از روش اطلاعات مقابل میان متغیرهای محیطی مورد استفاده شده است. همچنین بر پایه‌ی نظرات کارشناسی و بر مبنای مدلسازی‌های اولیه، از میان متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با یکدیگر داشتند تنها یک متغیر انتخاب و برای نقشه‌سازی به کار برده شد.

جدول ۱. شاخص‌های ماهواره ای مورد استفاده در این مطالعه

نوع	شاخص	رابطه	مرجع
گیاهی	DVI	$NIR - R$	Sulistyo et al., 2017
	NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	
	EVI	$\frac{2.5 \times (NIR - R)}{NIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1}$	
	MSAVI	$\frac{2 \times NIR + 1 - sqrt((2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - R))}{2}$	
	SAVI	$\frac{NIR - R}{(NIR + R + 0.5) \times 1.5}$	
	TVI	$\left(\frac{NIR - Red}{NIR + Red} + 0.5\right)^{1/2} \times 100$	
آب	NDWI	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	Xu, 2018
	MNDWI	$\frac{G - SWIR}{G + SWIR}$	Xu, 2006
توپوگرافی	TWI	$Ln\left(\frac{a}{\tan b}\right)$	Luca, 2011
خاک	BI (Brightness index)	$\frac{G^2 + R^2 + B^2}{3})^{0.5}$	Gholizadeh et al., 2018
	CI (Color Index)	$\frac{R - G}{R + G}$	

(عبارات R، G، B، NIR و SWIR به ترتیب نشان‌دهنده‌ی باندهای قرمز، سبز، آبی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه و a و b نشان‌دهنده‌ی شیب بالا دست و شیب محلی است).

پراکندگی ماده آلی با استفاده از مدل کریجینگ و جنگل تصادفی

در روش زمین آمار کریجینگ برای تخمین مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که اطلاعات آن اندازه گیری نشده است با استفاده از یک متوسط گیری متحرک وزنی خطی مقادیر اندازه گیری شده در همسایگی نقطه مورد نظر، به کار می‌رود. این روش از طریق معادله خطی (۱) محاسبه می-شود: $Z(x0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i\, Z\,(xi)$. در این معادله $Z(xi)$ مقدار اندازه گیری شده در مکان (xi) ، $Z\,(x0)$مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه $(x0)$ ، λiوزن داده شده به متغیر xدر نقطه iو n تعداد کل مشاهدات است. از مقادیر باقی مانده (اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده) برای تهیه نقشه پیوسته خطا به کریجینگ ساده استفاده می‌شود (حذف روند). در نهایت نقشه خطایی که به دست آمده را با نقشه حاصل از مدل درختی در محیط GIS با هم تلفیق کرده تا نقشه نهایی هدایت الکتریکی خاک به دست آید. رگرسیون کریجینگ یا کریجینگ بعد از حذف روند، یک روش هیبریدی است که شامل یک مدل رگرسیون و کریجینگ ساده است. به این منظور در ابتدا تمام لایه‌های اطلاعاتی به صورت سلولی تبدیل می شود. سپس یک رابطه رگرسیون درختی بین پارامترهای کمکی و داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک در نرم افزار کوبیست با مدل مکانی M5 ایجاد می‌شود. خروجی این نرم افزار به فرمت نقطه‌ای بوده و در محیط GIS به فرمت رستر تبدیل می‌شود. فایل رستری ایجاد شده نقشه رگرسیونی را تشکیل می‌دهد (Savari et al., 2020).

ارزیابی صحت مدل

برای مقایسه‌ی عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Squar Error) و ضریب همبستگی (R2) استفاده شد. مقادیر RMSE منفی نیستند و از صفر تا بی نهایت متغیر می‌باشند. مقادیر کم RMSE نشانه‌ی دقت بالای مدل است. جنگل تصادفی، یک الگوریتم یادگیری ماشین با قابلیت استفاده آسان است که اغلب اوقات نتایج بسیار خوبی را حتی بدون تنظیم پارامترهای مورد نظر، فراهم می‌کند. هم برای دسته بندی و هم رگرسیون قابل استفاده می‌باشد و جنگلی را به صورت تصادفی می‌سازد که گروهی از درخت‌های تصمیم هستند. از تعداد زیادی درخت‌های تصمیم گیری برای رسیدن به نتیجه نهایی استفاده می‌کند. هر درخت با استفاده از یک نمونه تصادفی انتخاب می‌شود. یک زیر مجموعه تصادفی از پیش بینی‌های ورودی در هر مجموعه از درخت برای تقسیم کردن به یک گروه جدید ایجاد می شود. اگر در این روش هر نمونه X را به صورت جداگانه در نظر بگیریم، هر درخت یک پیش بینی را برای رده نمونه X ارائه می‌دهد و در نهایت با بیشترین تعداد رای درختان، روی ورودی X به عنوان رده نمونه انتخاب می گردد. بنابراین هر درخت به صورت جداگانه یک پیش بینی کلاس را نشان می‌دهد و به این صورت کلاسی که دارای بیشترین تعداد باشد پیش بینی مدل مورد نظر را انجام می‌دهد. از این رو این روش یکی از روش‌های سازگار با تغییرات بوده و سبب از بین رفتن بی ثباتی در الگوریتم‌های تصمیم گیری می‌گردد. برای اجرای این مدل از افزونه RF در نرم افزار QuantumGIS استفاده شد. برای اجرای این دستور، میزان اهمیت پارامترهای ورودی به همراه R2 به عنوان معیاری از صحت مدل تولید گردید.

نتایج

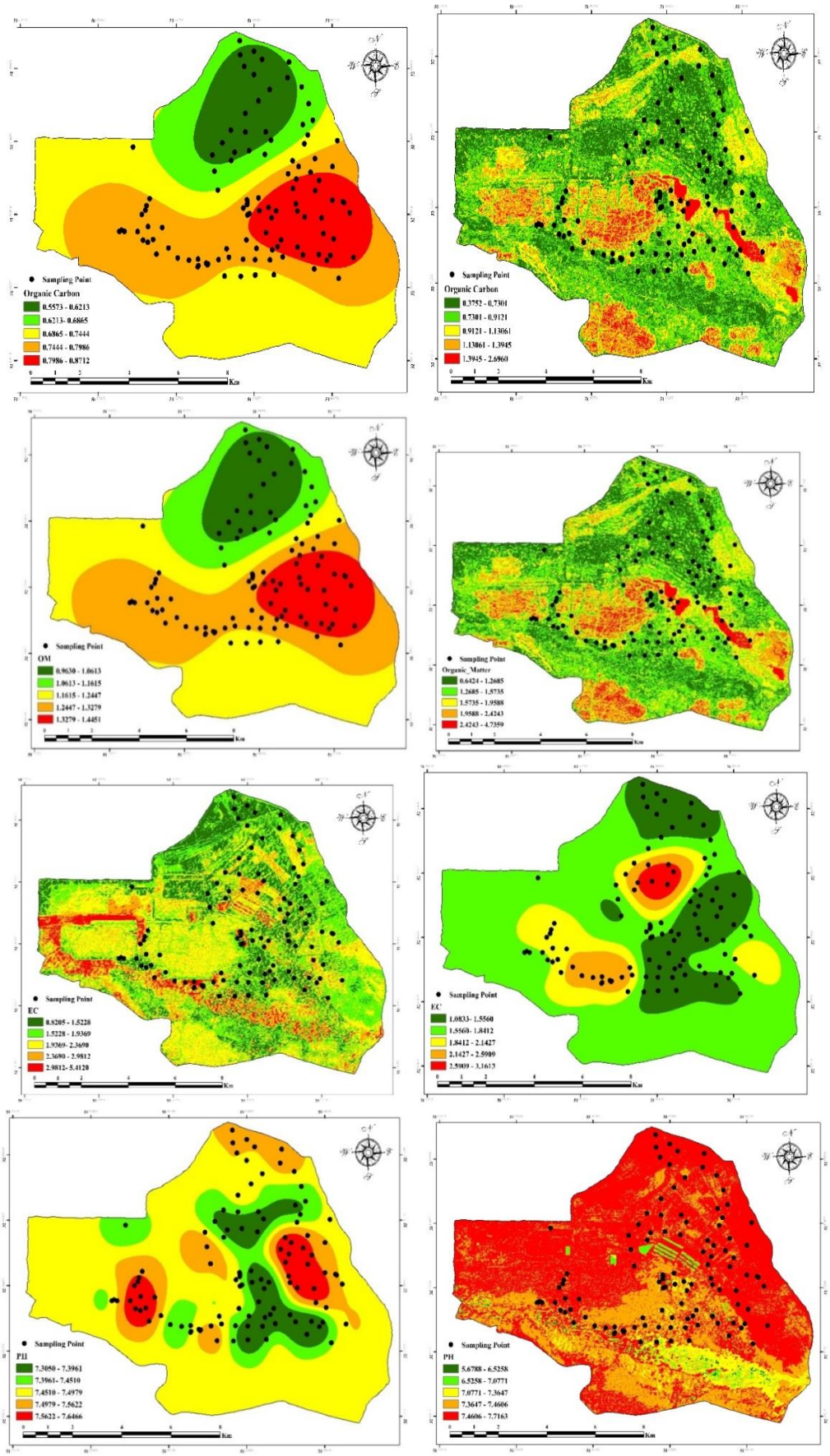
در این مطالعه، از ۱۶متغیر محیطی تاثیرگذار بر پراکنش پارامترهای خاک مورد بررسی، استفاده گردید. علاوه بر آن متغیر رطوبت توپوگرافی نیز به علت ایجاد بیش برازش در مدلسازی‌های اولیه حذف شد (جدول ۲). آماره RMSE نیز برای محاسبه‌ی صحت نقشه‌های تهیه شده و مقایسه‌ی روش‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. به طور کلی هر چه میزان آماره‌ی RMSE کمتر باشد صحت نقشه‌های به دست آمده بیشتر خواهد بود. نقشه‌های به دست آمده از روش جنگل تصادفی از صحت بسیار بهتری نسبت به روش کریجینگ برخوردار بوده است (جدول ۴). نقشه‌ی پهنه بندی تهیه شده با استفاده از

روش جنگل تصادفی جزئیات بسیار بیشتری را نسبت به نقشه‌ی کریجینگ نمایش می‌دهد. براساس خروجی روش جنگل تصادفی دامنه‌ی تغییرات کربن آلی در خاک محدوده‌ی مورد مطالعه از ۰/۳۷ تا ۲/۶۹ متغیر بوده و بیشترین میزان آن در زمین‌های کشاورزی شرق شهرستان زرین شهر و نیز محدوده‌های شهری موجود دیده می‌شود. در این رابطه نقشه‌ی پهنه بندی مواد آلی خاک نیز پراکندگی بسیار مشابهی با کربن آلی خاک نشان می‌دهد و تنها تفاوت‌های بسیار کمی همچون کاهش نسبی مواد آلی خاک در پیرامون محیط‌های شهری و کشاورزی به چشم می‌خورد. دامنه ی تغییرات مواد آلی خاک در محدوده مورد مطالعه از ۰/۶۴ تا ۴/۷۳ در تغییر است. براساس روش جنگل تصادفی تغییرات هدایت الکتریکی در محدوده‌ی ۰/۸۲ تا ۵/۴۱ قرار دارد. با این حال بیشترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به کاربری کشاورزی بوده و زمین‌های زراعی واقع در غرب شهرستان زرین شهر هدایت الکتریکی بیشتر از سایر قسمت‌ها نشان می‌دهند.

عمده قسمت‌های کاربری شهری نیز در دامنه‌ی هدایت الکتریکی ۱/۹۳ تا ۲/۳۶ قرار گرفته‌اند. دامنه ی pH خاک در محدوده مورد مطالعه از ۵/۶۷ تا ۷/۷۱ متغیر است. pH خاک در قسمت‌های قابل توجهی از کاربری کشاورزی (به جز در محدوده‌ی غرب شهرستان) در حالت‌های اسیدی و خنثی و در کاربری شهری بیشتر در حالت خنثی تا قلیایی مشاهده می‌گردد. همچنین روش‌های رگرسیون کاربری اراضی از متغیرهای محیطی به منظور محاسبه‌ی پارامترهای خاک استفاده می‌کنند. در همین راستا روش جنگل تصادفی می‌تواند اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی را نیز محاسبه نماید (شکل۲). متغیرهای Clay،Slope وSilt در مدلسازی کربن خاک و مواد آلی خاک در زمره‌ی مهمترین متغیرها قرار می‌گیرند. با این حال در مدلسازی هدایت الکتریکی BI، Silt و Aspect و در مدلسازی pH متغیرهای MNDWI، NDWI و DEM مهم تر از سایر متغیرها بوده‌اند (جدول ۳).

جدول ۲. نتایج بررسی همبستگی میان متغیرهای محیطی با استفاده از روش اطلاعات متقابل

	BI	CI	DVI	EVI	MNDWI	MSAVI2	NDVI	NDWI	SAVI	TVI	DEM	Slope	Aspect	TWI	Clay	Silt
BI		۸۲	۳۸٤	٤۲٤	۳۸	٤۲٤	٤۲٤	۲۷	٤۲٤	٤۲٤	۱۸۷	۷۳	۱	۷	۹۱	۱۲
CI	۸۲		۳۸٤	٤۲٤	۳۸	٤۲٤	٤۲٤	۲۷	٤۲٤	٤۲٤	۱۸۷	۷۳	۱	۷	۹۱	۱۲
DVI	۳۸٤	۳۸٤		٥۹۳	٥۱٥	۱/٥۹۳	۱/٥۹۳	۳۱۲	٥۹۳	٥۹۳	۲٦	۸٤	۲	۱	۱۰۸	۸
EVI	٤۲٤	٤۲٤	٥۹۳		٤٥۷	۷٦	٥/۷۲	۳۲٥	٥/۷۹	٥/۷۲	۲۳۲	۷۸	۱۷	۱	۱۰۱	۹
MNDWI	۳۸	۳۸	٥۱٥	٤٥۷		٤٥۷	٤٥۷	٤۲۸	٤٥۷	٤٥۷	۱٤۲	٤٤	۱٥	۷	٦٤	۷
MSAVI	٤۲٤	٤۲٤	٥۹۳	٥/۷٦	٤٥۷		٥/٦۹	۳۲٥	٥/۷٥	٥/٦۹	۲۳۲	۷۸	۱۷	۱	۱۰۱	۹
NDVI	٤۲٤	٤۲٤	٥۹۳	٥/۷۲	٤٥۷	٥/٦۹		۳۲٥	٥/۷٤	٥/۸۱	۲۳۲	۷۸	۱۷	۱	۱۰۱	۹
NDWI	۲۷	۲۷	۳۱۲	۳۲٥	٤۲۸	۳۲٥	۳۲٥		۳۲٥	۳۲٥	۱۳۲	۲۷	۱۲	۸	٦۱	٦
SAVI	٤۲٤	٤۲٤	٥۹۳	٥/۷۹	٤٥۷	٥/۷٥	٥/۷٤	۳۲٥		٥/۷۳	۲۳۲	۷۸	۱۷	۱	۱۰۱	۹
TVI	٤۲٤	٤۲٤	٥۹۳	٥/۷۲	٤٥۷	٥/٦	٥/۸۱	۳۲٥	٥/۷۳		۲۳۲	۷۸	۱۷	۱	۱۰۱	۹
DEM	۱۸۷	۱۸۷	۲٦	۲۳۲	۱٤۲	۲۳۲	۲۳۲	۱۳۲	۲۳۲	۲۳۲		۲٥۸	۲۲	۳۳	۳٦٤	۳
Slope	۷۳	۷۳	۸٤	۷۸	٤٤	۷۸	۷۸	۲۷	۷۸	۷۸	۲٥۸		۱۹	۱۳۱	۸٤	۱٤
Aspect	۱	۱	۲	۱۷	۱٥	۱۷	۱۷	۱۲	۱۷	۱۷	۲۲	۱۹		۲۹	۱٤	۲
TWI	۷	۷	۱	۱	۷	۱	۱	۸	۱	۱	۳۳	۱۳۱	۲۹		۱۲	۱٤
Clay	۹۱	۹۱	۱۰۸	۱۰۱	٦٤	۱۰۱	۱۰۱	٦۱	۱۰۱	۱۰۱	۳٦٤	۸٤	۱٤	۱۲		۷۱
Silt	۱۸۱	۱۸۱	۸۳	۸٦	٦٦	۸٦	۸٦	٥۷	۸٦	۸٦	۳۰٤	۱۳۷	۱۷	۱٤	۷۰۷	



شکل ۲. نقشه‌های پهنه بندی پارامترهای کربن آلی، ماده آلی، هدایت الکتریکی و pH خاک با استفاده از روش جنگل تصادفی (راست) و کریجینگ (چپ)

جدول ۳. اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای محیطی استفاده شده در مدل‌سازی هر یک از پارامترها در روش جنگل تصادفی

Parameter	Variable	Importance
OC	clay	۸/۱۷۱۱
	Slope	۶/۱۸۴۵
	Silt	۴/۷۶۹۱
	NDWI	۳/۷۴۲۱
	BI	۳/۴۰۷۲
	DVI	۳/۳۴۲۹
	DEM	۳/۲۵۸۲
	MSAVI	۳/۶۲۳
	Aspect	۲/۹۲۴۰
	MNDWI	۲/۹۰۶۲
OM	Clay	۲۵/۹۶۰
	Slope	۱۷/۷۹۰۶
	Silt	۱۳/۴۱۱۴
	NDWI	۱۱/۲۰۰۸
	BI	۱/۶۹۶۳
	DVI	۱/۶۰۵
	DEM	۹/۸۲۰۸
	Aspect	۹/۵۷۴۲
	MNDWI	۸/۸۳۷۵
	MSAVI	۸/۷۳۵۷
EC	Silt	۵۱/۱۳۷۸
	BI	۳۹/۴۷۸۸
	Aspect	۳۳/۸۷۴۲
	Clay	۲۷/۷۱۶۲
	DEM	۲۲/۹۵۱۵
	MSAVI	۲/۲۵۶۱
	NDWI	۱۸/۹۷۷۷
	DVI	۱۷/۸۶۴۷
	MNDWI	۱۷/۵۱۸۶
	Slope	۱۵/۲۲۹۹
pH	MNDWI	۴/۸۲۲۰
	NDWI	۲/۷۳۹۳
	DEM	۱/۸۷۵۴
	Clay	۹۱۱۸
	BI	۸۹۳۸
	Silt	۷۱۶۲
	DVI	۶۶۳۷
	Slope	۶۰۷۹
	Aspect	۵۲۶۹
	MSAVI	۵۲۳۴

جدول ٤. نتایج ارزیابی صحت مدل‌سازی با دو روش رگرسیون کاربری اراضی و کریجینگ

	LUR_RF Forest Random	Kriging Simple_Prediction
OC	۰/۳۱۷	۰/۶۲۹
OM	۰/۵۵۲	۱/۰۹۶
EC	۰/۷۶۸	۱/۵۰۳
PH	۰/۲۰۴	۰/۳۶۶

بحث

ماده آلی خاک نقش کلیدی در فرآیندهای مختلف کشاورزی و اکولوژیکی مربوط به حاصلخیزی خاک، چرخه‌ی ماده و تعاملات اتمسفری خاک نظیر ترسیب کربن را ایفا می کند. همچنین، مقدار ماده آلی خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مرتبط با کیفیت خاک مطرح است. جامعه علمی تلاش‌های قابل توجهی روی نقشه برداری مقدار ماده آلی خاک، مدلسازی تغییرات مکانی و تایید نقش اصلی آن در عملکرد زیست بوم‌ها ایفا نموده است. محققان اهمیت سنجش از دور را در علوم خاک و کشاورزی گزارش نموده‌اند. از این رو طی چند دهه گذشته، استفاده از روش‌های نقشه برداری برای پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک افزایش یافته است. نقشه برداری رقومی خاک را می‌توان به صورت سامان دهی و طبقه بندی ویژگی‌های خاک به وسیله مدل‌های ریاضی مبتنی بر آمار با کمک دانش کارشناسی و متغیرهای کمکی تعریف کرد (Raeesi et al., 2020). با توجه به اهمیت کربن آلی خاک در کشاورزی پایدار و حفاظتی و هم چنین نقش آن در گرمایش زمین و تغییراقلیم، 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 (Fatehi et al., 2020). اکوسیستم‌های خاکی نقش حیاتی را در چرخه جهانی کربن ایفا می‌کنند، زیرا این اکوسیستم‌ها به عنوان بزرگترین منبع کربن حاوی حدود ۱۵۰۰میلیارد تن کربن در عمق یک متری و حدود ۶۰۰میلیارد تن کربن در پوشش گیاهی می‌باشند که این دو منبع کربن در مجموع

سه برابر مقدار کربن موجود در اتمسفر است؛ بنابراین هر تغییری در ذخیره کربن گیاهان یا خاک به طور قابل توجهی به میزان co2 اتمسفر تاثیر می‌گذارد (Azadi and Sharifi, 2020). ذخیره کربن آلی خاک که عمدتا به مقدار کربن موجود در خاک به ازای سطحی مشخص از اراضی تا عمق معین بیان می‌شود (مانند کیلوگرم در هکتار)، یکی از منابع طبیعی با ارزش است که خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را کنترل کرده و می‌تواند موجب بهبود کیفیت خاک شود. کربن آلی خاک نقش بسیار مهمی در افزایش تولید محصولات کشاورزی، کاهش فرسایش خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای دارد. درک بهتر از مقدار و ذخیره کربن آلی خاک و تنوع مکانی آن برای استفاده از خاک و حفظ بهره وری آن موثر و ضروری می باشد. لذا نقشه‌ی دقیق مقدار و ذخیره کربن آلی خاک برای داشتن خط مبنایی از وضعیت کربن آلی خاک و نظارت بر تغییرات آن در طول زمان در مقیاس-های مختلف، برای درک مناسب از پاسخ‌های سیستم زمینی به تغییرات اقلیمی و تشخیص میزان ترسیب یا آزاد سازی کربن خاک به اتمسفر مورد توجه بسیاری است (Lahooti et al., 2018). اکثر مطالعات میزان ذخیره کربن را در یک زمان خاص در مقیاس‌های متفاوت بررسی نموده‌اند و پژوهش‌های اندکی در دنیا به بررسی تغییرات کربن در یک بازه زمانی پرداخته‌اند. پژوهشگران در خاک-های مناطق نیمه خشک، هدر رفت کربن پس از گذشت ۵-۳ سال را بین ۶۵-۳۵ درصد عنوان نمودند. مبارک و همکاران اثر طولانی مدت (بیش از ۴۰سال) و کوتاه مدت (کمتر از ده سال) زراعت نیشکر بر روی کربن آلی برخی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک سودان را در مقایسه با گیاهان بومی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزایش مواد آلی خاک برای کشت‌های طولانی مدت و کوتاه مدت بیش از گیاهان بومی بوده است (Feizi et al., 2020). از آنجایی که روش‌های سنتی نقشه برداری خاک در مقیاس‌هایی که کاربران کشاورزی و سایرکاربران ممکن است به آن نیاز داشته باشند پرهزینه و زمان بر هستند (Zeraatpisheh et al., 2017 ، Kempen et al., 2012)، تقاضا برای روش‌های سریع و دقیق برای تهیه‌ی نقشه ی خاک وجود دارد. در ایران، اکثر مطالعات خاک سنجی با استفاده از روش‌های سنتی انجام شده است و بیشتر کاربری‌هایی که در آن‌ها کشاورزی انجام نشده است، بدون نقشه باقی مانده‌اند (Zeraatpisheh et al., 2020). از مشکلات روش‌های سنتی عدم اطلاعات مناسبی از چشم انداز خاک، برای توصیف تغییرات واقعی خاک است علیرغم بیش از ۷۰ سال سابقه بررسی خاک در جهان (بطور مثال بررسی خاک در ایالات متحده ی آمریکا در سال ۱۸۹۹، روسیه در سال۱۹۰۸، کانادا در سال ۱۹۱۴، استرالیا و بریتانیا در دهه ۱۹۲۰، مکزیک در سال ۱۹۲۶، سریلانکا در سال ۱۹۳۰، چین در سال ۱۹۳۱، لهستان در سال ۱۹۳۵، هلند در سال ۱۹۴۵و غنا در سال ۱۹۴۶) (Brevik et al., 2017)، ایران تنها نقشه‌های خاک کمی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ یا با جزئیات بیشتر برای برنامه ریزی کاربری اراضی و برای هدایت شیوه‌های کشاورزی دارد (Bagheri bodaghabadi et al., 2015 & Zeraatpisheh et al., 2017). کشاورزی متراکم و مدیریت هیدرولوژی نیاز به نقشه‌های خاک با کیفیت بالا دارد. اگرچه نقشه سازی دیجیتالی خاک یک رویکرد معاصر است اما می‌تواند نقطه‌ی شروع خوبی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک (که در آن بررسی سنتی خاک انجام نمی‌شود) باشد (Zeraatpisheh et al., 2020). می‌توان از روش‌های نقشه سازی دیجیتالی خاک، نه تنها برای پیش بینی خواص پیوسته خاک مانند کربن آلی خاک و محتوای بافت خاک، بلکه برای پیش بینی ویژگی‌های ناپیوسته خاک مانند طبقات خاک و افق خاک با عدم قطعیت‌های مرتبط در این تخمین‌ها استفاده کرد. علاوه بر این، تکنیک‌های نقشه سازی دیجیتالی خاک می‌توانند علاوه بر نقشه برداری مناطق جدید، برای ارتقای کیفیت نقشه‌های قبلی نیز مورد استفاده قرار گیرند (Grunwal.d, 2009). رگرسیون کاربری اراضی یکی از روش‌های سنتی نقشه سازی دیجیتالی خاک است که در آن مشاهدات میدانی و

آزمایشگاهی به همراه متغیرهای محیطی به منظور پیش بینی پارامترهای خاک به کارگیری می‌شوند. در این مطالعه، از نمونه برداری‌های میدانی و داده‌های ماهواره‌ای sentinel-2 به عنوان ورودی رگرسیون کاربری اراضی با روش جنگل تصادفی استفاده شد. به علاوه روش کریجینگ نیز به عنوان روشی بسیار پرکاربرد در زمینه‌ی پهنه بندی به منظور بررسی کارایی روش رگرسیون کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. در روش‌های رگرسیون کاربری اراضی، بسیاری از عوامل تاثیرگذار بر پراکنش پارامترهای مورد بررسی در فرآیند مدل سازی دخیل می‌شوند. با این حال روش‌های میان یابی همچون کریجینگ تنها براساس فاصله اقدام به نقشه سازی پارامتر مورد نظر در گستره‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه می‌کنند. عملکرد مدل جنگل تصادفی و کریجینگ برای هر پارامتر خاک با محاسبه ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر نشان داد روش رگرسیون کاربری اراضی بسیار بهتر از روش کریجینگ عمل نموده است. در این رابطه pH کمترین خطا (۰/۲۰۴۸) و هدایت الکتریکی خاک بیشترین خطا (۰/۷۶۸۹) را در فرآیند مدلسازی داشته‌اند. Hengl و همکاران در سال ۲۰۱۵ گزارش کردند که مدل جنگل تصادفی دقت مدلسازی pH را در مقایسه با سایر مدل‌های رگرسیون خطی ۲۰٪ بهبود بخشید. Vagen و همکاران در سال ۲۰۱۶ نیز با استفاده از مدل جنگل تصادفی به عملکرد خوبی (RMSE ۰/۳۲-۰/۳۶) دست یافتند. Khaledian و Miler در سال ۲۰۲۰، نیز روش جنگل تصادفی را یکی از بهترین روش‌ها برای نقشه سازی پارامترهای خاک عنوان نمودند. نتایج مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۱) نیز نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی عملکرد خوبی در پیش بینی مواد آلی خاک از خود نشان داد. Tziachris و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعه خود تایید کردند که روش‌های جنگل تصادفی و کریجینگ عملکرد خوبی در تهیه نقشه پراکنش مواد آلی از خود نشان دادند و روش جنگل تصادفی بهتر از کریجینگ عمل کرد که در تطابق با این تحقیق است.

تنوع کاربری اراضی و مدیریت زمین در حوضه مورد مطالعه باعث تغییر در مقادیر پارامترهای مختلف خاک شده است. (Popescu et al., 2005). مقادیر میانگین OC و OM نشان می‌دهد که خاک در کاربری شهری غنی از کربن و مواد آلی و به طور متوسط تا حدودی خنثی هستند که با مقدار pH (۷ تا ۷/۷) مشهود است. در بخش‌های مرکزی منطقه مورد مطالعه، زمین‌های زراعی به دلیل ارتفاع کمتر و دسترسی بیشتر، نسبت بیشتری از سطح زمین را اشغال کردند و منجر به OC کمتر به دلیل خاک‌ورزی مکرر شده که سرعت تجزیه مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد (Lal, 2002; Osunbitan et al., 2005;Sarkar and Kafatos, 2004). در این مطالعه، محتوی رس، شیب و محتوای سیلت مهمترین متغیرهای محیطی در پیش بینی OC و OM بوده است. شیب بر رطوبت خاک، دمای خاک و تراکم پوشش گیاهی اثر گذار است.

در این مطالعه نمونه برداری در ماه تیر انجام گرفته و تصاویر ماهواره‌ای نیز از همین ماه دریافت شد. تصاویر ماهواره‌ای در این ماه به علت ابر کمتر و افزایش بازتاب مستقیم از سطح خاک اطلاعات بهتری را در دسترس قرار می‌دهند. استفاده از شاخص‌های محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌ای بدون بهره گیری از لایه‌های دیگری همچون کاربری اراضی و... و معرفی آن‌ها به عنوان متغیرهای محیطی یا مستقل به روش رگرسیون کاربری اراضی یکی از اقدامات این مطالعه با هدف افزایش سرعت نقشه سازی پارامترهای خاک بود. این موضوع می‌تواند در نقشه سازی‌ها در مناطق وسیع تر اثرگذاری بسیار بیشتری داشته باشد و در عین حال بر صحت نقشه‌ها نیز (در مقایسه با روش‌های میان یابی صرف) بیفزاید. تنوع کاربری اراضی و مدیریت زمین در حوضه مورد مطالعه باعث تغییر در مقادیر پارامترهای مختلف خاک شده است (Popescu et al., 2005). عدم قطعیت در نتایج را می‌توان به عوامل متعددی از جمله روش‌های

تحقیق، اندازه گیری‌ها، مکان‌ها، عملکرد مدل و داده‌ها نسبت داد (Odgers et al., 2015)). نمونه‌های گرفته شده برای آموزش مدل باید نماینده ناهمگونی ویژگی‌های بیوفیزیکی سطح مانند توپوگرافی سطح، کاربری زمین و پوشش زمین باشد. مکان‌های غیرقابل دسترس در منطقه مورد مطالعه، به ویژه قسمت‌های مهمی از مکان‌های شهری و صنعتی، قابل نمونه برداری نیستند که ممکن است بر نمایندگی نقاط نمونه برداری تاثیر بگذارد. تعداد نقاط داده نیز به خصوص در روش‌های یادگیری ماشین مهم است. کاهش تعداد نقاط نمونه در روش‌های یادگیری ماشین از جمله جنگل تصادفی منجر به کاهش چشمگیر صحت مدلسازی خواهد شد. نتایج این مطالعه نشان دهنده قابلیت تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲ در برآورد خصوصیات خاک است. قلی زاده[1] و همکاران (۲۰۱۸) نیز در مطالعه خود در خصوص برآورد کربن آلی خاک با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ به قابلیت و کارایی بالای این تصاویر اشاره کردند. کاستالدی[2] و همکاران (۲۰۱۸) نیز در مطالعه خود به منظور ارزیابی قابلیت داده‌های سنتینل ۲ برای پیش بینی کربن آلی خاک در مزارع به این نتیجه دست یافتند که قدرت تفکیک مکانی داده‌های این ماهواره برای نشان دادن تغییرات مکانی کربن آلی خاک در مقیاس منطقه‌ای مناسب است که این نتایج در تطابق با مطالعه ی حاضر است. به طور کلی در مطالعات مدلسازی ویژگی‌های خاک، آگاهی از شرایط خاک در یک منطقه موردمطالعه باعث می‌شود تا پارامترهای دخیل در مدل به بهترین نحو ممکن انتخاب شوند و در نتیجه به مدل دقیق‌تری دست پیدا کرد. برای تحقیقات آتی می توان این موارد را پیشنهاد کرد. از جمله پارامترهای خاک که بسیار بر رشد گیاهان نیز موثر است فلزات سنگین هستند. پیشنهاد می‌شود که رگرسیون کاربری اراضی با استفاده از متغیرهایی همچون شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در راستای پیش بینی فلزات سنگین خاک مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده از متغیرهایی مانند زمین شناسی، بافت خاک و ... اگرچه ممکن است دسترسی به آن‌ها مشکل‌تر از شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای باشد با این حال می‌تواند دقت به دست آمده از نقشه‌های تهیه شده را افزایش دهد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، نقشه دیجیتالی چهار پارامتر اصلی خاک شامل کربن آلی، مواد آلی، هدایت الکتریکی و pH خاک با استفاده از روش جنگل تصادفی و کریجینگ تهیه شد. متغیرهای کمکی مختلف که همگی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شده بود برای پیش بینی استفاده شد. خروجی مدل جنگل تصادفی نشان داد که ترکیب متغیرهای کمکی مختلف به ترتیب مقادیری معادل با ۰/۳۱۲، ۰/۵۴۴۳، ۰/۷۳۴۸و۰/۱۶۱۸ از خطای مدلسازی کربن آلی، مواد آلی، هدایت الکتریکی و pH خاک را در منطقه مورد مطالعه کاهش می‌دهد. به طور کلی این مطالعه نشان داد که مدل-های رگرسیون کاربری اراضی براساس پیش بینی مبتنی بر روش جنگل تصادفی می‌تواند به ترسیم سریعتر و کارآمدتر پارامترهای خاک کمک کند. در منطقه مورد مطالعه، مقادیر بیشینه‌ی کربن آلی و مواد آلی خاک پراکندگی بیشتری در کاربری شهری داشتند و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی و اسیدیته‌ی خاک نیز در زمین‌های کشاورزی مشاهده شد. مهمترین متغیرهای مؤثر بر توزیع فضایی کربن آلی و مواد آلی خاک Clay، Slope و Silt بودند. با این حال در مدل سازی هدایت الکتریکی Silt، BI و Aspect و در مدل سازی pH متغیرهای MNDWI، NDWI و DEM مهمتر از سایر متغیرها ثبت شدند. نتایج این مطالعه نشان دهنده کارایی بالای به کارگیری داده‌های سنجش ار دور در تهیه نقشه توزیع ویژگی‌های گوناگون خاک است. در مناطقی که مشکل دسترسی به داده‌های زمینی وجود دارد و یا با مشکل کمبود منابع مالی برای نمونه برداری زمینی و تهیه نقشه خصوصیات خاک مواجه هستند استفاده از کارایی تصاویر ماهواره ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی، راهکار بسیار مناسبی در راستای مطالعه منطقه در مقیاس وسیع و با صرف هزینه پایین است.

[1] Gholizadeh
[2] Castaldi

Reference:

Azadi, N., & Sharifi, Z. (2020). Comparative study of the effects of wildfire and land use change on Soil Organic Carbon decomposition rate in aggregate size fraction of the Northern Zagros Oak Forest. J. of water and soil conservation, vol 27 (4), 167-184. doi: 10.22069/jwsc.17875.3345 (In persian)

Bagheri bodaghabadi, M., Martinez-Casasnovas, J.A., Khalili, P., & Masihabadi, M. (2015a). Assessment of the FAO traditional land evaluation methods, A case study: Iranian Land Classification method. Soil Use Manage. 31, 384–396.

Brevik, E.C., Pereira, P., Muooz-Rojas, M., Miller, B.A., Cerdà, A., Parras-Alcntara, L., & Lozano Garca, B. (2017). Historical perspectives on soil mapping and process modelling for sustainable land use management. In: Pereira, P., Brevik, E., Mouooz-Rojas, M., Miller, B. (Eds.), Soil Mapping and Process Modelling for Sustainable Land Use Management. Elsevier, Amsterdam, pp. 3–28. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805200-6.00001-3.

Castaldi, F., Hueni, A., Chabrillat, S., Ward, K., Buttafuoco, G., Bomans, B., Vreys, K., Brell, M., Wesemael, B. (2019). Evaluating the capability of the Sentinel 2 data for soil organic carbon prediction in croplands. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 147, 267–282. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.026.

Fahmideh, S., Davari, M., Mosaddeghi, M.R., & Sharifi, Z. (2019). Performance evaluation of reflectance spectroscopy for estimation of soil organic carbon content in Zerbar lake watershed, Kurdistan province. J. of water and soil conservation vol. 26 (6):59-78. doi: 10.22069/jwsc.16387.3171. (In persian)

Fatehi, Sh., Eftekhari, K., & Ghaderi, J. (2020). Spatial downscaling of digital Soil Organic Carbon map using Dissever algorithm. J. of soil Management and Sustainable Production, 10 (2), 25-45. doi: 10.22069/ejsms.16857.1902 (In persian)

Fathololoumi, S., Vaezi, A. R., Alavipanah, S. K., Ghorbani, A., Saurette, D., & Biswas, A. (2020). Improved digital soil mapping with multitemporal. remotely sensed satellite data fusion: A case study in Iran. Science of the Total Environment, 721, 137703. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.137703.

Fathololoumi, S., Vaezi, A., Alavipanah, K., & Ghorbani, A. (2020). Modeling Soil Organic Carbon variations using Remote Sensing Indices in Ardabil Blikhli chay watershed. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51 (9), 2417-2429. doi: 10.22059/ijswr.299509.668542. (In persian)

Feizi, H., Maleki, S., & Poozeshi, R. (2020). Impact of vegetation cover on Soil Organic Carbon storage and CO2 Fixation in Long-Term Land Uses in Bajestan, Khorasan Razavi. Applied Soil Research, 8 (4), 181-196. (In persian)

Ghafari, H., Arabkhedri, M., & Gorji, M. (2021). An overview on soil loss tolerance methods: challenges and opportunities. Watershed Engineering and Management, 13 (2), 389-404. doi: 10.22092/ijwmse.342692.1787. (In persian)

Gholizadeh, A., Zizala, D., Saberioon, M., Boruvka, L. (2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. Remote Sensing of Environment, 218, 89-103, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015.

Grunwald, S. (2009). Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. Geoderma, 152 (3), 195–207.

Hengl, T., Heuvelink, G.B., Kempen, B., Leenaars, J.G., Walsh, M.G., Shepherd, K.D. and Tamene, L. 2015. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution, Random forests significantly improve current predictions. PloS one, 10 (6): 1-26.

Javanmand, A., Nazari, B., Jalilian, A., & Dashti, Sh. (2015). Effect of Different Levels of vermicompost and chemical Fertilizer applications on some physicochemical characteristics of soil and wheat (Triticum aestivum L.cv.Bahar) yield in Rotation with sugar Beet. Water and science soil. 26 (4/1), 167-181. (In persain)

Kempen, B., Brus, D.J., Stoorvogel, J.J., Heuvelink, G., & de Vries, F. (2012). Efficiency comparison of conventional and digital soil mapping for updating soil maps. Soil Sci. Soc. Am. J. 76 (6), 2097–2115.

Kettler, T.A., Doran, J., Gilbert, T.L. (2001). Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses. Soil Science Society of America Journal, 65: 849-852.

Lahooti, P., Emadi, S.M., Bahmanyar, M.A., & Ghajar Sepanlou, M. (2018). Soil Organic Carbon Mapping by Geostatistics and Artificial Neural Network Methods (Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province). Journal of water and soil, 32 (6), 1135-1148. (In persian)

Lucà, F., Conforti, M., and Robustelli, G. 2011. Comparison of GISbased gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. Geomorphology, 134 : 297–308.

Malik, S., Bhowmik, T., Mishra, U., & Paul, N. (2020). Mapping and prediction of soil organic carbon by an advanced geostatistical technique using remote sensing and terrain data. Geocarto International, https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1815864.

Mohkum Hammad, H., Khalig, A., Abbas, F., Farhad, W., Farhad, Sh., Aslam, M., Mustafa Shah, Gh., Nasim, W., Mubeen, M., & Bakhat, H. (2020). Comparative Effects of Organic and Inorganic Fortilizers on

Soil Organic Carbon and Wheat Productivity under Arid Region. Communication in Soil Science and Plant Analysis. https://doi.org/10.1080/00103624.1763385.

Noor, H., & Mirnia, Kh. (2009). Organic matter losses in kojour watershed. J. of water and soil conservation, 18 (3), 207-211. (In persian)

Norouzi, A., & Fathi, E. (2018). Evalution of Agritourism Development Capabilities and Determination of Its Adoption in the Target Population (Farmers and Tourists) in Lenjan. Geography and Development. 16 (51), 241-260. doi: 10.22111/gdij.3872. (In persian)

Noshadi, E., Bahrami, H.A., & Alavipanah, S.K. (2014). Study the Relationship between Digital Number values from ETM+Satellite Images and Soil Organic Matter Using Artificial Neural Network and Regression Models. Environmental Erosion Researches, 4 (1), 29-38. (In persian)

Odgers, N.P., Holmes, K.W., Griffin, T., & Liddicoat, C. (2015). Derivation of soil-attribute estimations from legacy soil maps. Soil Research, 53, 881–894.

Page, AL., Miller, RH., & Jeeney., DR. (1992). Methods of soil analysis, part 2. In: Chemical and Mineralogical Properties. Soil Science Society of American Publication, Pp: 1159.

Pandi, H., Asadi Kapourchal, S., Vazifedoust, M., & Rezaei, M. (2020). Simulation of Rice Yield and its components using SWAP Model and Remote Sensing Technology for Optimal use of water and soil Resources. Environment and water Engineering, 6 (4), 374-387. doi: 10.22034/jewe.242119.1398. (In persian)

Popescu, R., Deodatis, G., Nobahar, A. (2005). Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. Probabilistic Engineering Mechanics, 20, 324–341.

Raeesi, M., Zolfaghari, A., Yazdani, M., & Sabetizade, M. (2020). Investigating the Ability of Landsat 8 and Sentinel 2A Satellite Images for Estimating Soil Organic Matter and Available Phosphorus in Semnan Plain. *Iranian Journal of Soil Research*, 34 (1), 111-125. doi: 10.22092/ijsr.122157. (In persian)

Sadeghi, M., & Ahmadi Nadoushan, M. (2020). Evalution and Modeling Soil Salinity Using Remote Sensing, Regression Model and Random Forest. Iranian Journal of Soil Research, 34 (4), 486-500. (In persian)

Savari, Z., Hojati, S., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Digital Mapping of surface soil salinity in Khuzestan province, using Regression Kriging. Journal of water and soil science, 25 (3), 159-175. 10.47176/jwss.25.3.24654. (In persian)

Sodango, T., Sha, J., Li, X., Noszczyk, T., Shang, J., Aneseyee, A., & Bao, Zh. (2021). Modeling the spatial Dynamics of Soil Organic Carbon Using Remotely-Sensed Predictors in Fuzhou city, China. Remote sensing, 13 (9), 1682. https://doi. Org/ 10.3390/rs13091682.

Sulistyo, B.T., Gunawan, P., Danoedoro, N. and Listyaningrum, N. 2017. Absolute Accuracy of the Erosion Model of DEM-NDVI an-9d its Modification. International Journal of Geoinformatics, 13 (2): 13-20.

Tziachris, P., Aschonitis, V., Chatzistathis, T., Papadopoulou, M. (2019). Assessment of spatial hybrid methods for predicting soil organic matter using DEM derivatives and soil parameters. Catena, 174, 206-216.

Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. International Journal of Remote Sensing, 27 (14), 3025-3033.

Xu, Y., Smith, S.E., Grunwald, S. Abd-Elrahman, A., Wani, S.P. and Nair, V.D. 2018. Estimating soil total nitrogen in smallholder farm settings using remote sensing spectral indices and regression kriging. Catena, 163, 111-122.

Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., & Finke, P. (2017). Comparing the efficiency of digital and conventional soil mapping to predict soil types in a semi-arid region in Iran. Geomorphology, 285, 186–204. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.02.015

Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bodaghabadi, M. B., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., & Xu, M. (2020). Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. Catena, 188, 104424. https://doi.org/10.1016/j.catena.104424.

Zhang, M., Zhang, M., Yang, H., Jin, Y., Zhang, X., Liu, H. (2021). Mapping Regional Soil Organic Matter Based on Sentinel-2A and MODIS Imagery Using Machine Learning Algorithms and Google Earth Engine. Remote Sens., 13, 2934. https://doi.org/10.3390/rs13152934.

Zhou, T., Geng, Y., Chen, J., Liu, M., Haase, D., & Lausch, A. (2020). Mapping soil organic carbon content using multi-source remote sensing variables in the Heihe River Basin in China. Ecol. Indic. 114, 106288. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.106288.

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 12
No. 2 (46)
Winter 2023

Received:
2022-04-26

Accepted:
2022-10-17

Pages: 133-147

Modeling Soil Organic Matter Distribution Using Remote Sensing and Random Forest Model and Kriging in Lenjan County

Fatemeh shiranitabar[1] and Mozhgan Ahmadi Nadoushan[2*]

1) MSc student, Environmental Sciences, Department of Environmental Sciences, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, Iran.
2) Department of Environmental Sciences, Waste and Wastewater Research Center, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
*Corresponding author email: m.ahmadi1984@gmail.com, m.ahmadi@khuisf.ac.ir

Abstract:
Background and Aim: Soil is one of the most important natural resources that provides more than 97% of human food needs. Soil organic matter (SOM) is an important soil quality factor that greatly affects soil's physical, chemical, and biological properties. Modeling and mapping of soil properties are critical in many environmental, climatic, ecological, and hydrological applications. The main objective of this study is to model the distribution of soil organic matter and organic carbon using satellite images and random forest and kriging models in Lenjan County.
Method: In this study, digital maps of four main soil parameters including soil organic carbon, soil organic matter, electrical conductivity, and pH are prepared using random forest and Kriging methods in Lenjan County. Based on homogeneous land units, a total of 110 points in the study area are determined, and in these points, samples are taken from a depth of 0 to 30 cm of soil surface. Sampling is done in July 2021 and Sentinel-2 satellite images are acquired from the same month because better information is available this month due to fewer clouds and increased direct reflection from the soil surface. In addition, 16 environmental variables affecting the distribution of soil parameters are used. Various auxiliary variables such as NDVI, NDWI, DEM, and Slope are used for prediction, which are all directly or indirectly extracted from satellite images.
Results: The maps obtained by the random forest method showed more accuracy than the kriging method. The zoning map prepared using the random forest method displays much more details than the map prepared by kriging method. The output of the random forest model with the combination of different auxiliary variables showed values equal to 0.312, 0.54, 0.73 and 0.16 of the modeling error for soil organic carbon, organic matter, electrical conductivity and pH, respectively. In the study area, the maximum values of soil organic carbon and organic matter were observed in urban areas and the highest values of electrical conductivity and pH were observed in agricultural lands. The most important variables affecting the spatial distribution of organic carbon and soil organic matter are clay, slope and silt. While in modeling electrical conductivity, silt BI and Aspect and in modeling pH, MNDWI, NDWI and DEM variables are recorded as more important than other variables.
Conclusion: In general, this study demonstrates that land use regression models based on random forest method can help mapping soil parameters faster and more efficiently. There is a strong need for efficient and accurate methods, including land use regression, for continuous monitoring of changes in soil quality in different landscapes. Land use regression contributes developing advanced maps of soil quality parameters using cost-effective and accessible spatial information.
Keywords: Kriging, land-use regression, random forest model, Sentinel-2 Satellite images, soil organic carbon

10.30495/WSRCJ.2022.66981.11297