

## بررسی پراکنش مکانی کربن آلی خاک در منطقه فندوقلو استان اردبیل

مهران بهتری، مهدی نادری خوراسگانی<sup>1</sup> و احمد کریمی

دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک دانشگاه شهرکرد؛ mehran.behtari@gmail.com

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهرکرد؛ khnaderi@yahoo.com

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهرکرد؛ karimiahmad1342@sku.ac.ir

ص 405 - 426

دریافت: 1401/6/22 و پذیرش: 1401/12/9

### چکیده

پتانسیل یک خاک منظر به عنوان ذخیره‌گاه کربن با برآورد میزان کربن آلی خاک در مقیاس منطقه‌ای مشخص می‌شود. این بررسی با اهداف شناسایی (1) مناسب‌ترین ویژگی‌های خاک و محیط به‌عنوان داده‌های کمکی برای برآورد تراکم کربن آلی خاک و (2) روش مناسب برای پهنه‌بندی تراکم کربن آلی خاک از بین روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و رگرسیون-کریجینگ در منطقه فندوقلو، استان اردبیل انجام شد. در گام نخست پایگاه داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی منطقه مطالعاتی با معرفی داده‌های خاک، توپوگرافی و ماهواره‌ای ایجاد شد. سپس با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و زمین‌شناسی مکان برداشت 140 نمونه خاک مرکب سطحی (0-15 سانتی‌متر) با استفاده از فن آبر مکعب لاتین در منطقه مزبور مشخص شد. نتایج نشان داد که نوع کاربری اراضی به‌طور معنی‌داری ( $P \leq 0/01$ ) بر تراکم کربن خاک مؤثر بوده و تراکم کربن آلی خاک در اراضی مرتعی بیش‌تر از زراعی بود. نیتروژن کل خاک و میانگین قطر خاکدانه‌ها همبستگی معنی‌داری ( $P \leq 0/001$ ) با تراکم کربن آلی خاک نشان دادند و به‌عنوان داده‌های کمکی برای برآورد تراکم کربن آلی خاک قابل استفاده بودند. کاربرد کوکریجینگ همراه با نیتروژن کل خاک به‌عنوان داده کمکی، پهنه‌بندی تراکم کربن خاک را در مقایسه با کریجینگ معمولی بهبود بخشید. بطور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که رگرسیون-کریجینگ بیش‌ترین کارایی را برای پهنه‌بندی تراکم کربن خاک داشت و نیتروژن کل خاک، میانگین وزنی خاکدانه‌ها، شاخص تفاضل گیاهی نرمال و انحنای زمین مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر خاک منظر بر تراکم کربن آلی خاک بودند.

واژه‌های کلیدی: داده‌های کمکی، نیتروژن کل خاک، کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، رگرسیون-کریجینگ

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: شهرکرد، دانشگاه شهرکرد - دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

## مقدمه

مکانی مقدار و تراکم کربن آلی خاک در بسیاری از مناطق بزرگ بکار گرفته شده است (لیو و همکاران، 2012).

معمولاً تغییرات مکانی کربن آلی خاک با جمع‌آوری نمونه‌های خاک به روش تصادفی یا سیستماتیک صورت می‌گیرد. اگر تعداد کافی نمونه جمع‌آوری شود، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف درونیابی نقشه کربن آلی خاک را تهیه کرد (رادوکای و همکاران، 2021). روش‌های وزندهی معکوس فاصله<sup>4</sup> و کریجینگ معمولی<sup>5</sup> برای درونیابی توزیع مکانی کربن آلی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (کانفورتی و همکاران، 2017). استفاده از متغیرهای کمکی برای درونیابی تحت عنوان کوکریجینگ<sup>6</sup> اولین بار توسط مک‌براتی و وبستر در سال 1983 ارائه شد. کوکریجینگ نیز در واقع نوعی کریجینگ توسعه یافته است که در آن از رابطه بین متغیر اصلی با یک یا چند متغیر کمکی برای درونیابی متغیر اصلی استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که روش کوکریجینگ دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ دارد (وو و همکاران، 2009).

در سال‌های اخیر، ترکیبی از رگرسیون و درونیابی مکانی رگرسیون-کریجینگ<sup>7</sup> را برای تعیین توزیع مکانی ویژگی‌های خاک پیشنهاد شده است. در این روش، انتخاب متغیرهای کمکی ضروری است و تصاویر سنجنش از دور به طور معمول انتخاب اول هستند (منگ، 2014). در همین زمینه، جیا فام و همکاران (2019) به ارزیابی مناسب‌ترین متغیرهای محیطی برای برآورد کربن آلی خاک با مدل‌های رگرسیون-کریجینگ و روش کریجینگ معمولی پرداختند. آن‌ها از فاکتورهای محیطی از قبیل نوع کاربری اراضی، شاخص خیسی و شاخص گیاهی TSAVI

اطلاعات مربوط به کیفیت خاک نقش مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع و کاربری اراضی دارند. معمول‌ترین و مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک، کربن آلی خاک است. کربن آلی خاک به دلیل تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک قابلیت استفاده عناصر غذایی و هدایت الکتریکی از اهمیت بالایی برخوردار هستند (یوهنیا و همکاران، 2014). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد 81 درصد کربن موجود در بیوسفر زمین در خاک ذخیره شده است (لوکوئرو، 2015). تراکم کربن آلی خاک جهانی حدود 1500-1400 پیکوگرم کربن در 100 سانتی‌متر لایه خاک برآورد شده است (لوفر و همکاران، 2017) که در حدود دو برابر مقدار کربن در اتمسفر و سه برابر مقدار کربن ذخیره شده در گیاهان است (اسمیت، 2004). یک متر بالایی خاک تقریباً 1408 پیکوگرم کربن آلی را ذخیره کرده و 60 پیکوگرم کربن در سال را با جو مبادله می‌کند (لوکوئرو، 2015). تراکم کربن آلی خاک<sup>1</sup> برای اندازه‌گیری ذخیره کربن آلی خاک استفاده می‌شود (وو و همکاران، 2022). بنابراین بررسی عوامل کنترل کننده تراکم کربن آلی خاک برای بهبود میزان ترسیب کربن<sup>2</sup> و تضمین امنیت غذایی و بررسی تغییرات آب و هوایی حیاتی است (وو و همکاران، 2022). تراکم کربن آلی خاک تحت تاثیر عوامل طبیعی مثل ویژگی‌های خاک (نوع و بافت خاک)، اقلیم (درجه حرارت و بارندگی)، موجودات زنده (پوشش-گیاهی و زیواچه‌های خاک)، عوامل توپوگرافی (مثل ارتفاع، درجه و جهت شیب) و مواد مادری قرار می‌گیرد (وو و همکاران، 2022).

زمین آمار<sup>3</sup> ابزار قدرتمندی است که برای مدل‌سازی تغییرات خاک مورد استفاده قرار گرفته و به طرز گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل تغییرپذیری و توزیع

<sup>4</sup> Inverse Distance Wighting, IDW

<sup>5</sup> Ordinary Kriging, OK

<sup>6</sup> Co-Kriging, CoK

<sup>7</sup> Regression-Kriging, RK

<sup>1</sup> Soil Organic Carbon Density, SOCD

<sup>2</sup> Carbon sequestration

<sup>3</sup> Geostatistic

از روش‌های غیرمستقیم از جمله شاخص‌های گیاهی، ویژگی‌های توپوگرافی و مشتقات آنها نظیر میزان پوشش-گیاهی، ارتفاع، شیب و جهت شیب به برآورد کربن آلی خاک کمک می‌کنند (پیلهور شهری و همکاران، 1389). داده‌های سنجش از دور مانند داده‌های به‌دست آمده از ماهواره‌های لندست می‌تواند متغیر کمکی مفیدی برای برآورد برخی از ویژگی‌های خاک‌ها باشد. در این زمینه عطائیان و همکاران (1396) تغییرات میزان کربن آلی خاک در دو منطقه بحرانی و آسیب‌پذیر مراتع دشت قهاوند در شرق استان همدان را با استفاده از سنجش از دور و GIS مورد بررسی قرار دادند. تعداد هشت شاخص مختلف پوشش گیاهی و روشنایی محاسبه شد. شاخص-های ماهواره‌ای محاسبه شده همبستگی پیرسون نسبتاً خوبی با میزان کربن آلی خاک از خود نشان دادند (0/48 تا  $R^2=0/38$ ). نتایج آنها نشان دهنده امکان استفاده از شاخص‌های طیفی تصویر ماهواره‌ای لندست هشت، برای بررسی و مطالعه ذخایر کربن آلی خاک در دشت قهاوند وجود دارد.

برای نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک براساس متغیرهای محیطی، پژوهشگران اغلب به‌دلیل به‌صرفه‌تر و کاربردی‌تر بودن برای مدیریت پایدار خاک از ویژگی‌های زمین به-عنوان متغیرهای مستقل استفاده می‌کنند (ژو و همکاران، 2018). در همین زمینه تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (2016) برای تهیه نقشه رقوم کلاس خاک و کربن آلی خاک در شهر بانه در استان کردستان، از متغیرهای کمکی داده‌های سنجش از دور و پارامترهای سرزمینی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مناسب‌ترین متغیرهای کمکی جهت پهنه‌بندی کلاس خاک و کربن آلی خاک شاخص NDVI، شاخص رس، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا<sup>4</sup> و شاخص خیسی بودند. منطقه فندقلوی اردبیل به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم-ترین ذخیره‌گاه بوته‌های فندق (*Corylus avellana L.*)

<sup>1</sup> استفاده کردند. نتایج نشان داد که کاربری زمین تاثیر زیادی بر ویژگی خاک به‌ویژه کربن آلی خاک دارد. آنها گزارش کردند که مدل کریجینگ معمولی با  $RMSE^2$  برابر با 0/327 و  $ME^3$  برابر با 0/034- در مقابل روش رگرسیون-کریجینگ با  $RMSE$  و  $ME$  به‌ترتیب برابر با 0/337 و 0/041- مناسب‌تر است. جان و همکاران (2021) با بررسی برآورد کربن آلی خاک با استفاده از مشتقات زمینی به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER در نیجریه گزارش نمودند که روش رگرسیون-کریجینگ با  $RMSE$  برابر با 0/515 و  $ME$  برابر با 0/075- نسبت به روش کریجینگ معمولی با  $RMSE$  و  $ME$  به-ترتیب برابر با 0/586 و 0/038- کارایی بالایی دارد. در پژوهشی دیگر وانگ و همکاران (2012) با بررسی کربن آلی خاک با استفاده از متغیرهای محیطی حاصل از سنجنده MODIS و نقشه DEM منطقه هونان چین گزارش نمودند که روش رگرسیون-کریجینگ نسبت به روش کریجینگ معمولی برتری دارد. ارزیابی دقت نشان داد که روش رگرسیون-کریجینگ با ترکیب با عوامل محیطی، میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطای کم-تری داشت. رگرسیون-کریجینگ به‌دلیل هزینه کم‌تر به یک روش قابل قبول برای نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک تبدیل شده است، از سویی، دقت آن اغلب از روش‌های دیگر بهتر است (سرمدیان و همکاران، 2014). با این حال، صحت روش رگرسیون-کریجینگ در همه مطالعات موردی مشخص نیست زیرا به روابط واقعی خاک و متغیر محیطی بستگی دارد (سان و همکاران، 2012).

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های نوین، کم هزینه و سریع مانند فناوری سنجش از دور به‌علت توانایی در شناسایی پدیده‌ها از جمله آلودگی‌های زیست محیطی، ارزیابی روند تغییرات تالاب‌ها، هواشناسی و کیفیت هوا، کیفیت آب و تجزیه و تحلیل حرارتی شهر همواره مورد توجه بوده است (بونجیوانی و لوبارتینی، 2006). استفاده

<sup>1</sup> Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

<sup>2</sup> Root Mean Square Error, RMSE

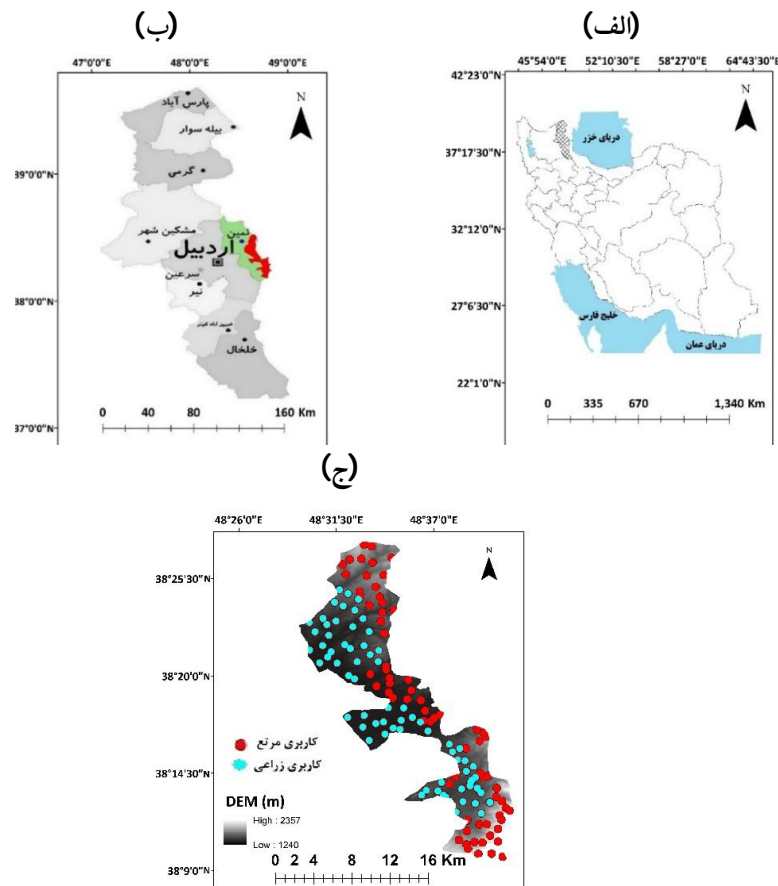
<sup>3</sup> Mean Error, ME

<sup>4</sup> Multi Resolution Valley Bottom Flatness, MRVBF

## مواد و روش‌ها

منطقه فندوقلو وسعتی حدود 176/87 کیلومتر مربع دارد و در 25 کیلومتری شمال‌شرقی شهر اردبیل و 9 کیلومتری جنوب‌شرقی شهر نمین بین عرض جغرافیایی  $38^{\circ}22'10''$  و  $38^{\circ}24'09''$  شمالی و طول جغرافیایی  $48^{\circ}31'30''$  و  $48^{\circ}34'03''$  شرقی واقع شده است (شکل 1). متوسط دمای ده ساله (1399-1390) منطقه براساس گزارش اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور (ایستگاه سینوپتیک نمین)  $11/1$  درجه سانتی‌گراد با میانگین دمای حداقل  $6/11$  و میانگین دمای حداکثر  $15/5$  درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارش سالانه در همین بازه زمانی (1390-1399)،  $253/24$  میلی‌متر با بیشینه بارش  $342/58$  میلی‌متر و کمینه بارش  $115/51$  میلی‌متر است.

در کشور مطرح است. نتایج مربوط به مطالعه تغییرات کاربری اراضی در منطقه فندوقلو طی سال‌های 1379، 1386 و 1396 نشان می‌دهد که تغییر کاربری در مناطق غیرجنگلی از سال 1379 تا سال 1396 بیش از 1200 هکتار بوده است (جوان و همکاران، 1399). در این بررسی با مطالعه جامع و بکارگیری اطلاعات مربوط به خاک، اقلیم، پوشش گیاهی و توپوگرافی منطقه با استفاده از ترکیب داده‌های زمینی و سنجش از دور، ویژگی‌های مهم و تأثیرگذار بر میزان تراکم کربن آلی خاک را در دو کاربری مرتع و زراعی منطقه فندوقلو را از بین اطلاعات موجود مورد بررسی قرار دهد و روش مناسب زمین‌آماری برای برآورد تراکم کربن آلی خاک در منطقه فندوقلو معرفی کند.



شکل 1- موقعیت منطقه مطالعاتی فندوقلو در کشور (الف)، استان اردبیل و شهرستان نمین (ب)، مدل ارتفاعی رقمی به همراه نقاط نمونه برداری شده در دو کاربری (ج)

شاخص‌های ثانویه خیزی و انتقال رسوب<sup>7</sup> از شاخص-های اولیه استخراج شد (زیوهبرگن و ترون، 1987).

برای تعیین مکان نقاط نمونه‌برداری نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و زمین‌شناسی منطقه مورد استفاده قرار گرفت و با کاربرد فن آبر مکعب لاتین<sup>8</sup> مکان نقاط نمونه-نمونه‌برداری مشخص شد (شیلدز و ژانگ، 2016). از هر کدام از واحدهای کاربری (مرتع و زراعی) 70 نمونه مرکب از خاک سطحی (0-15 سانتی‌متر) پس از کنار زدن لاشبرگ‌های سطحی خاک تهیه شد. نمونه‌های خاک از پنج نقطه با آرایش مربعی به فاصله 30 متر از همدیگر به یک مقدار با بیلچه جمع‌آوری و مخلوط شد (جان و همکاران، 2021) (شکل 2).

نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل، هواخشک و کوبیده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (بویوکوس، 1962)، وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه (هازلتون و مورفی، 2007)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (کمپر و روزینو، 1986)، کربن آلی خاک به روش والکلی-بلک (دی ووس و همکاران، 2007)، نیتروژن کل به وسیله دستگاه کج‌دال (ماتیجوویچ، 1995)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (فتون و همکاران، 1993) اندازه‌گیری شد.

#### تراکم کربن آلی خاک در کاربری‌ها

به منظور محاسبه تراکم کربن آلی خاک در دو کاربری مرتع و زراعی از معادله (1) استفاده شد (فانگ و همکاران، 2012):

(1)

$$SOC_{D(0-15\text{ cm})} = \sum_i^m [C_i] \times [\rho_{bi}] \times [LD_i]$$

نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل، هواخشک و کوبیده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (بویوکوس، 1962)، وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه (هازلتون و مورفی، 2007)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به روش الک تر (کمپر و روزینو، 1986)، کربن آلی خاک به روش والکلی-بلک (دی ووس و همکاران،

مساحت مراتع منطقه 88 کیلومتر مربع که شامل 191 گونه متعلق به 145 جنس و 47 خانواده از گیاهان آوندی است که از میان آن‌ها دولپه‌ای‌ها با 158 گونه و 38 خانواده غنی‌ترین گروه‌ها هستند. در بخش زراعی نیز اکثر اراضی تحت کشت دیم بوده و نوع محصولات کشاورزی به ترتیب وسعت مساحت شامل گندم دیم، جو، نباتات علوفه‌ای، یونجه و اسپرس است (تیمورزاده و همکاران، 1394).

#### تشکیل بانک داده‌های زمینی

برای تشکیل بانک داده‌های زمینی منطقه فندوقلو، نقشه‌های مربوطه و گزارش‌های آنها از منابع مختلف جمع‌آوری شد. تصاویر ماهواره‌ای لندست هشت برداشت شده در تاریخ 17 مرداد 1399 (هفت آگوست 2020) با پوشش ابرناکی کم‌تر از 10 درصد در 11 باند از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده گرفته شد (<https://www.earthexplorer.usgs.gov/>).

شیپ‌فایل<sup>1</sup> نقشه زمین‌شناسی منطقه فندوقلو در مقیاس 1:100000 از سایت سازمان نقشه‌برداری کشور استخراج شد (<https://www.ncc.gov.ir/>). همچنین شیپ‌فایل نقشه خاک‌شناسی نیمه تفصیلی و شیپ‌فایل نقشه کاربری اراضی منطقه فندوقلو با مقیاس 1:50000 از سایت پایگاه ملی اطلاعات خاک ایران مورد استفاده قرار گرفت (<http://www.nsiswri.ir/>). شیپ‌فایل نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس 1:25000، با فاصله خطوط منحنی میزان 5 متر و تصویر UTM بر مبنای WGS-1984 تهیه شد (<https://www.rsgisc.com/>). با استفاده از نقشه توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع<sup>2</sup> از روی لایه شبکه نامنظم مثلثی<sup>3</sup> منطقه تهیه شد (اشرفی و علیمی، 1393). شاخص‌هایی همچون جهت شیب<sup>4</sup>، درجه شیب<sup>5</sup> و انحنا<sup>6</sup> از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شد و

<sup>1</sup> Shape File

<sup>2</sup> Digital Elevation Model, DEM

<sup>3</sup> Triangulated Irregular Networks, TIN

<sup>4</sup> Slope Aspect

<sup>5</sup> Slope Gradient

<sup>6</sup> Plane Curvature

<sup>7</sup> Sediment Transport Index, STI

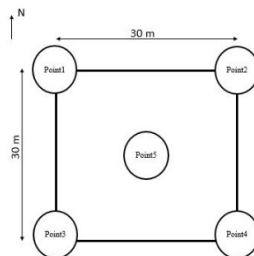
<sup>8</sup> Latin Hypercube, LHC

## تراکم کربن آلی خاک در کاربری‌ها

به منظور محاسبه تراکم کربن آلی خاک در دو کاربری مرتع و زراعی از معادله (1) استفاده شد (فانگ و همکاران، 2012):

(1)

$$SOCD_{(0-15\text{ cm})} = \sum_i^m [C_i] \times [\rho_{bi}] \times [LD_i]$$



شکل 2- نحوه نمونه‌برداری مرکب از پنج نقطه در منطقه فندوقلو

(4)

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)}$$

که در آن‌ها:  $L + \lambda$ : تابندگی طیفی ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m$ )،  $ML$  ضریب تبدیل شماره عددی به تابندگی،  $AL$  عرض از مبدا تبدیل،  $Q_{cal}$  نشان دهنده اعداد پیکسل باند 10،  $T$  دمای تابندگی سطح زمین (کلوین)،  $K_1$  و  $K_2$  ثابت حرارتی برای هر باند برحسب درجه کلوین است. در سنجنده حرارتی لندست هشت برای باند 10 مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  به ترتیب برابر با 774/89 و 1321/08 است.  $L\lambda$  طول موج مرکزی هر باند (میکرومتر) است. پارامترهای به کار رفته در معادله‌های 3 و 4 در فایل فراداده تصاویر لندست هشت وجود دارد. درجه حرارت به دست آمده بر حسب کلوین است (بارسی و همکاران، 2014).

شاخص خیزی به‌عنوان شاخصی از توزیع مکانی رطوبت خاک، در طول زمین‌نما است (معادله 5). این شاخص به طور گسترده برای مشخص کردن توزیع مکانی و پتانسیل نواحی برای تولید رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرد (واگا و همکاران، 2020).

(2007)، نیتروژن کل به وسیله دستگاه کج‌دال (ماتیجوویچ، 1995)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (فتون و همکاران، 1993) اندازه‌گیری شد.

شاخص گیاهی تفاضل نرمال از مهم‌ترین عوامل مؤثر در برآورد توزیع کربن در کاربری‌های مختلف است (پیلهور شهری و همکاران، 1389؛ ماچنا، 2017). این شاخص بر اساس تفاوت بازتاب در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک برای خاک و گیاه است (معادله 2).

(2)

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

که در آن:  $R$  و  $NIR$  به ترتیب بازتاب خاک در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک است.

دمای سطح زمین<sup>1</sup> براساس داده‌های سنجنده از دور حرارتی (باند 10) برآورد شد. برای این کار نخست شماره رقومی تصاویر باندهای حرارتی به تابندگی<sup>2</sup> و به دنبال آن آن به دمای تابندگی تبدیل شد (معادله‌های 3 و 4) (بارسی و همکاران، 2014).

(3)

$$L + \lambda = (ML \times Q_{cal}) + AL$$

<sup>1</sup> Land Surface Temperature, LST

<sup>2</sup> Radiance

(5)

در روش کریجینگ معمولی مقدار متغیر در هر نقطه نمونه برداری نشده با استفاده از یک متوسط گیری متحرک وزنی خطی مقادیر اندازه‌گیری شده در همسایگی نقطه مورد نظر برآورد می‌شود (معادله 7) (ایساک و سیرواستاوا، 1989).

(7)

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

که در آن:  $Z^*(x_0)$  مقدار برآورد شده  $Z$  در موقعیت  $x_0$ ،  $\lambda_i$  وزن نسبت داده شده به متغیر  $Z$  در نقطه  $x_i$  و  $n$  تعداد نقاط همسایگی است. یک مدل مناسب بر اساس توزیع داده های ورودی برای توصیف استمرار مکانی داده‌ها و نشان دادن رابطه مکانی بین جفت نقاط مورد نیاز است.

روش کوکریجینگ حالت تعمیم یافته روش کریجینگ است. کوکریجینگ یک روش زمین آماری اساسی و مهم است که از یک متغیر اصلی و یک متغیر ثانویه تشکیل شده که این دو متغیر با هم همبستگی داشته و از نظر مکانی به هم وابسته هستند. توابع نیم‌تغییرنمای متقابل در کوکریجینگ برای نشان دادن تغییرات مکانی ویژگی‌ها به کار می‌رود (کان و همکاران، 1994). در این مطالعه درصد نیتروژن کل خاک به عنوان داده کمکی انتخاب شد (معادله 8).

(8)

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_1(x_i) + \lambda_{2i} Z_2(x_i)$$

که در آن:  $\lambda_{1i}$  و  $\lambda_{2i}$  وزن های آماری مربوط به متغیرهای  $Z_1$  و  $Z_2$  است.

رگرسیون-کریجینگ یک روش درون‌یابی مکانی است که ترکیبی از رگرسیون متغیرهای وابسته بر روی برآوردکننده‌ها با کریجینگ باقی‌مانده‌های<sup>5</sup> برآورد است (هنگل و همکاران، 2004). در روش رگرسیون-کریجینگ ابتدا با استفاده از رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام رابطه بین تراکم کربن آلی با گروه داده‌های مختلف (ویژگی‌های خاک و توپوگرافی و نیز شاخص‌های پوشش گیاهی و

$$WI = \text{Ln} \left( \frac{A_s}{\tan \beta} \right)$$

که در آن:  $A_s$  مساحت ویژه حوضه<sup>1</sup> برحسب  $\frac{m^2}{m}$  است که به صورت مساحت کل حوضه تقسیم بر طول خطوط تراز تعریف می‌شود.  $\beta$  درجه شیب برحسب رادیان است. شاخص انتقال رسوب نماینگر فرآیندهای فرسایش و رسوب بوده و به طور عمده تأثیر شیب بر فرسایش را نشان می‌دهد (مور و همکاران، 1993).

(6)

$$STI = \left( \frac{A_s}{22.13} \right)^m \left( \frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^n$$

که در آن:  $A_s$  و  $\beta$  همان فاکتورهای قبلی و پارامترهای  $m$  و  $n$  به ترتیب برابر با  $0/6$  و  $1/3$  است.

#### تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری

در بررسی‌های زمین آماری فرض بر نرمال بودن توزیع داده‌ها بود بنابراین، قبل از استفاده از مدل‌های زمین آماری، در این پژوهش وضعیت نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف<sup>2</sup> بررسی شد. ویژگی‌های درصد سیلت، درصد شن کل، وزن مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه دارای توزیع نرمال نبودند که با استفاده از روش  $Idf$  normal نرمال شدند. تبدیل  $Idf$ .Normal در نرم افزار SPSS نسخه 23 موجود بوده و جز جدیدترین و ساده‌ترین روش‌ها برای نرمال سازی داده‌ها است. این تبدیل از میانگین و انحراف معیار داده‌ها برای نرمال سازی استفاده می‌کند (تمپلتون، 2011). همچنین قبل از تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری، ناهمسان‌گردی<sup>3</sup> و حضور و عدم حضور روند هر متغیر با ترسیم واریوگرام سطحی<sup>4</sup> بررسی شد. با ترسیم واریوگرام سطحی در متغیرهای مورد بررسی هیچ‌گونه علائمی از ناهمسان-گردی مشاهده نشد.

<sup>1</sup> Specific Cathment Area

<sup>2</sup> Kolmogorov-Smirnov test

<sup>3</sup> Anisotropy

<sup>4</sup> Variogram Surface

<sup>5</sup> Residual

(11)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_0 - Z_p)$$

(12)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Z_p - Z_0)^2}{\sum_{i=1}^N (Z_p - \bar{Z})^2}$$

که در آن‌ها:  $Z_0$  مقادیر مشاهده شده،  $Z_p$  مقادیر برآورد

شده،  $\bar{Z}$  میانگین داده‌ها و  $n$  تعداد داده‌ها است.

برای ثبت داده‌ها از Excel و تحلیل آماری به‌وسیله

نرم‌افزار SPSS v.23 انجام شد. نرمال بودن داده‌ها با

استفاده از آزمون کلوموگروف-اسمیرنوف<sup>2</sup> انجام شد

(گیسن و همکاران، 2009). برای انجام مدل‌سازی با

روش رگرسیون خطی چند متغیره به روش گام‌به‌گام<sup>3</sup> از

نرم‌افزار SPSS v.23 استفاده شد. برای رسم و استخراج

آمار توصیفی نیم‌تغییرنمای داده‌های زمینی از نرم‌افزار

Variowin v.2.2 و برای رسم نقشه‌ها از محیط برنامه Arc

Map در نرم‌افزار Arc GIS v.10.8.1 و نرم‌افزار Origin

v.9.9 استفاده شد. در نهایت برای رسم نمودارها از نرم-

افزار Curve Expert v.1.4 استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### توصیف آماری داده‌ها

آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه

خاک‌ها و نیز داده‌های محیطی در دو کاربری مرتع و

زراعی در جدول (1) ارائه شده است. نمونه خاک‌های

مورد مطالعه در کاربری‌های مرتع و زراعی از نظر کلاس

بافتی متنوع و در مجموع در هفت کلاس بافتی شامل

لومی، لومرسی، لوم‌شنی، لوم‌رسی سیلتی، لوم‌رسی، رس

سیلتی و لوم‌سیلتی قرار گرفت.

بیش‌ترین مقدار کربن آلی خاک در کاربری مرتع با

میانگین 3/43 درصد و کم‌ترین مقدار آن در اراضی

زراعی با میانگین 2/92 درصد بود. این اختلاف نشان‌گر

تأثیرپذیری بالای افق سطحی خاک‌ها در منطقه مورد

مطالعه از اعمال مدیریت‌های گوناگون، ویژگی‌های

دمای سطح زمین) بدست آمد. در گام بعدی با استفاده از

مدل بدست آمده نقشه اولیه تراکم کربن آلی خاک تهیه

شد. سپس مقدار باقیمانده‌ها با استفاده از کریجینگ

معمولی درون‌یابی شد. در نهایت نقشه نهایی تراکم کربن

آلی خاک از جمع نقشه اولیه با نقشه باقیمانده‌ها بدست

آمد (معادله 9) (مک‌براتی و ویستر، 1986).

(9)

$$Z^*(x_0) = \sum_{k=0}^p \beta_k + q_k(x_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(x_i)$$

که در آن:  $\beta_k$  ضرایب مدل رگرسیون برآورد شده،

$q_k(x_0)$  مقادیر متغیرهای کمکی در محل  $x_0$ ،  $p$  تعداد

متغیرهای کمکی و  $n$  تعداد مشاهدات است.  $\lambda_i$  نیز وزن

کریجینگ است که توسط ساختار مکانی باقی‌مانده‌ها

تعیین می‌شود.  $e(x_i)$  مقدار باقی‌مانده در محل  $x_i$  است.

#### صحت‌سنجی مدل‌ها

برای ارزیابی عملکرد هرکدام از روش‌های درون‌یابی

از روش ارزیابی متقاطع<sup>1</sup> استفاده شد (دوبرول، 1983).

برای ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل‌ها از شاخص‌های

آماري ضریب تبیین ( $R^2$ ), ریشه میانگین مربعات خطا

(RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد (معادله‌های

10-12). ضریب تبیین نشان می‌دهد که چند درصد از

تغییرات متغیر وابسته با متغیرهای مستقل توضیح داده

می‌شوند و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا بیانگر تفاوت

میان مقدار برآورد شده با مدل یا برآوردگر آماری و مقدار

واقعی است، شاخص میانگین خطا میزان آریب بودن

برآورد را نشان می‌دهد، مقادیر مثبت بیانگر بیش برآورد

مدل و مقادیر منفی نشان دهنده کم برآورد در برآورد مدل

است (حسینی و همکاران، 2016).

(10)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_0 - Z_p)^2}$$

<sup>2</sup> Kolmogorov-Smirnov, K-S

<sup>3</sup> Stepwise

<sup>1</sup> Cross Validation



شاخص خیسی از متغیرهای توپوگرافی ثانویه و بیانگر توزیع مکانی رطوبت است و در واقع میزان تجمع آب در خاک و در سطح زمین را نشان می‌دهد (فلورینسکی، 2012). میانگین شاخص خیسی برای کاربری مرتع 6/14 و در کاربری زراعی 7/10 بود (شکل 3-ه). به دلیل پایین بودن میزان درجه شیب و انحنای سطح زمین، کاربری زراعی نسبت به کاربری مرتع شاخص خیسی خاک بالاتری را نشان داد. میانگین مقادیر شاخص انتقال رسوب که قدرت فرسایش‌دگی جریان‌ها را بر روی زمین نشان می‌دهد در کاربری زراعی 0/33 و در کاربری مرتع 0/23 بود (شکل 3-و). مقادیر بالای شاخص انتقال رسوب نشان دهنده نواحی با خطر بالای فرسایش هستند. این شاخص با در نظر گرفتن واگرایی و همگرایی جریان، نمایان‌گر پتانسیل فرسایش‌پذیری سطوح به فرسایش‌های صفحه‌ای و شیاری است که شکل‌های غالب فرسایش آبی محسوب می‌شوند (میتاسوا و همکاران، 1996). بالا بودن مقادیر انتقال رسوب در اراضی زراعی احتمالاً به دلیل عمق کم خاک در این کاربری باشد. در زمین‌های زراعی منطقه به دلیل فعالیت‌های مکانیکی و زیرو رو شدن‌های متوالی خاک، خاکدانه‌های حساس خرد شده و امکان انتقال رسوب وجود دارد.

مقدار NDVI برای مناطق تنک بین 0/05 تا 0/1، برای مناطق گیاهی متوسط بین 0/1 تا 0/6 و برای مناطق گیاهی بسیار متراکم و غنی بین 0/6 تا 0/7 است (روس و همکاران، 1973). کم‌ترین مقدار NDVI در منطقه برابر با 0/064 در کاربری زراعی بود (شکل 4-الف).

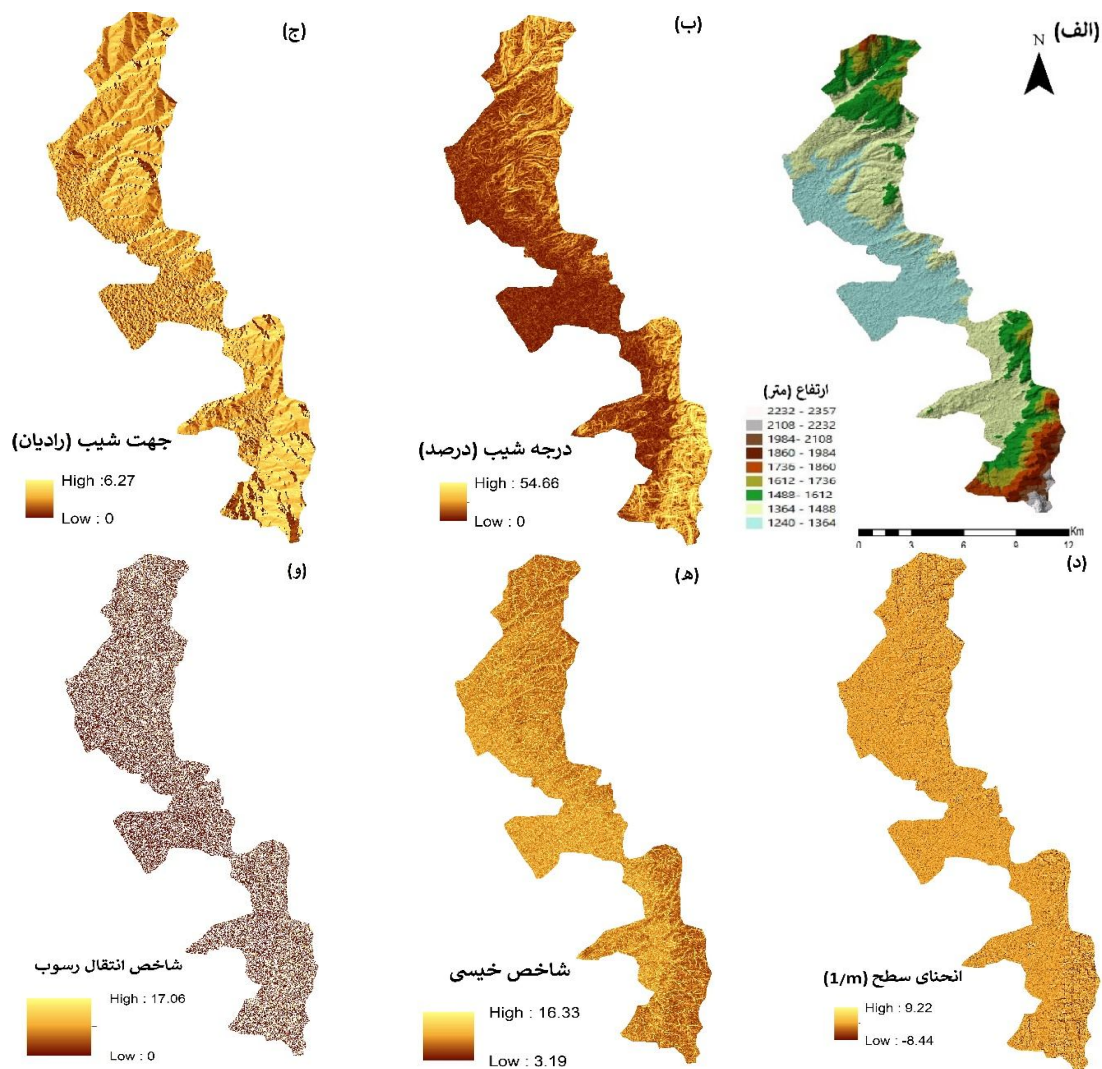
محیطی و تخریب اراضی است. تغییرات مشتقات توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه ممکن است باعث تغییر در توزیع رطوبت خاک و پوشش گیاهی شده که آن‌هم به نوبه خود تغییرات کربن آلی خاک منطقه را به دنبال داشته است. بالا بودن میزان کربن آلی خاک در اراضی زراعی احتمالاً به سابقه خاک‌های منطقه مربوط بود، زیرا در گذشته منطقه جنگلی بوده است (جوان و همکاران، 1399) که به مرور زمان، دستخوش تغییر کاربری به مرتع و سپس به اراضی زراعی شده است.

نتایج آزمون t جفتی برای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و همچنین داده‌های محیطی نشان داد که در دو کاربری مرتع و زراعی ویژگی‌های رس، سیلت، وزن مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی، نیتروژن کل، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص خیسی، شاخص گیاهی تفاضل نرمال و دمای سطح زمین تفاوت معنی‌دار با احتمال یک درصد ( $P \leq 0/01$ ) و ویژگی‌های شن کل و کربنات کلسیم معادل با احتمال پنج درصد ( $P \leq 0/05$ ) معنی‌دار بودند.

نقشه مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع در شکل (3) آمده است. بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع منطقه به ترتیب برابر با 2044 و 1115 متر بود (شکل 3-الف). کاربری مرتع در ارتفاعات بالاتر قرار داشت. شیب متوسط منطقه در کاربری مرتع 10/71 درصد و در کاربری زراعی 4/70 درصد است (شکل 3-ب). جهت شیب موجود در منطقه برای کاربری مرتع بیش‌تر جهت شمال‌غربی و برای کاربری زراعی جنوب‌غربی بود (شکل 3-ج).

جدول 1- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و داده‌های سنجش از دور خاک‌های مورد مطالعه در کاربری مرتع و زراعی منطقه فندوقلو (تعداد=140)

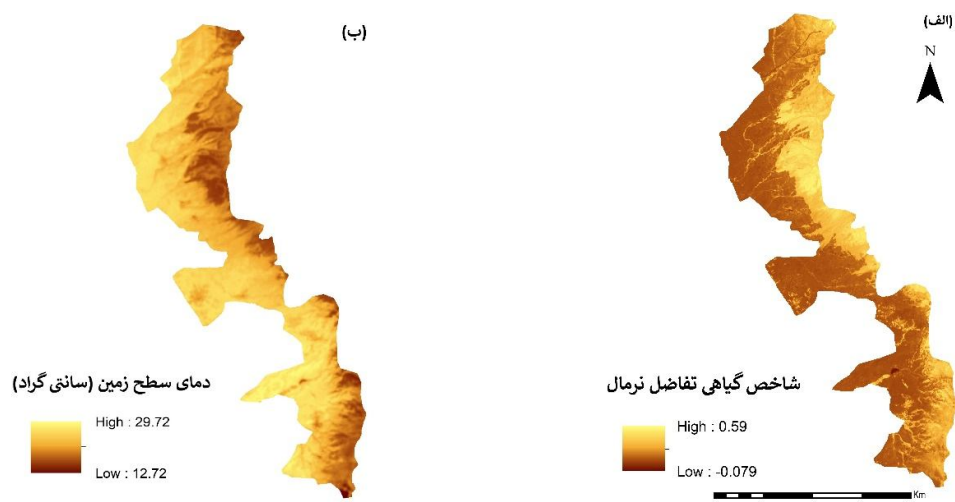
ویژگی‌ها	کاربری	محدوده تغییرات	میانگین	انحراف معیار	ت جفتی	ویژگی‌ها	کاربری	محدوده تغییرات	میانگین	انحراف معیار	چولگی	t جفتی
رس (%)	مرتع	13/64-42/12	27/75	7/56	0/04	ارتفاع (m)	مرتع	2182-1328	1580	211/75	1	62/40**
	زراعی	13/20- 54/10	36/24	8/03	-0/14		زراعی	1557-1318	1405	64/38	0/35	
سیلت (%)	مرتع	21/30 - 52/50	33/71	6/10	0/54	درجه شیب (%)	مرتع	1/39- 32/53	10/71	6/89	1/09	10/29**
	زراعی	22/50 - 50	30/16	4/74	1/15		زراعی	1/06- 19/47	4/70	3/25	1/90	
شن کل (%)	مرتع	15/27 - 58/21	38/52	9/83	-0/11	جهت شیب (RAD)	مرتع	0/46- 6/18	3/82	1/74	-0/51	2/65**
	زراعی	10/82- 55/55	33/59	9/11	0/001		زراعی	0- 6/22	3/01	1/88	-0/12	
وزن مخصوص ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )	مرتع	1/18 - 1/41	1/27	0/04	0/52	انحنای سطح (m <sup>-1</sup> )	مرتع	-2/44 - 4	0/13	0/97	0/44	15/75**
	زراعی	1/13 - 1/35	1/21	0/04	0/67		زراعی	-1/33- 2/22	0/03	0/68	0/61	
میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm)	مرتع	0/82 - 1/28	1/03	0/12	0/18	شاخص خیسی	مرتع	4/13- 9/58	6/14	1/24	1/12	-36/47**
	زراعی	0/69 - 1/20	0/95	0/13	0/03		زراعی	4/44- 10/50	7/10	1/47	0/66	
تراکم کربن آلی خاک (g.cm <sup>-2</sup> )	مرتع	41/65- 97/83	65/46	13/04	0/39	شاخص انتقال رسوب	مرتع	0- 2/40	0/23	0/42	3/07	-1/11 <sup>ns</sup>
	زراعی	20/70 - 77/04	54/41	11/43	-0/66		زراعی	0- 3/29	0/33	0/60	3/42	
کربن آلی (%)	مرتع	2/12- 5/26	3/43	0/72	0/43	شاخص گیاهی تفاضل نرمال	مرتع	0/067- 0/483	0/256	0/11	0/049	12/08**
	زراعی	1/15 - 4/52	2/92	0/66	-0/53		زراعی	0/064 - 0/503	0/145	0/12	1/89	
نیتروژن کل (g/Kg)	مرتع	1/47- 5/29	3/75	0/98	-0/44	دمای سطح زمین (°C)	مرتع	17/57- 28/34	21/63	2/63	0/66	46/40**
	زراعی	1/01 - 3/69	2/53	0/66	-0/39		زراعی	17/25- 28/97	25/21	2/64	-1/56	
کربنات کلسیم (%)	مرتع	8- 13/5	10/71	1/40	0/018							
	زراعی	3 - 14/25	11/30	2/01	-1/16							



شکل 3 - نقشه ویژگی‌های اولیه (ارتفاع، درجه و جهت شیب، انحنای سطح) و ثانویه (شاخص خیسی و شاخص انتقال رسوب) توپوگرافی منطقه فندوقلو

گیاهی در زمین‌های زراعی ربط داد، زیرا تصاویر اخذ شده مربوط به ماه مرداد بوده و در آن زمان اکثر محصولات زراعی از زمین‌ها برداشت شده‌اند، بنابراین سطح زمین بیش‌تر در معرض تشعشع خورشیدی قرار داشت. از سوی دیگر، روشن است که سطح بدون پوشش زمین‌های زراعی در جذب انرژی و افزایش دمای سطحی تأثیرگذار است. جمالی و همکاران (1398) نیز نشان دادند که اراضی با کاربری بایر به دلیل نداشتن پوشش حفاظتی، دارای دمای بیش‌تری بودند.

با توجه به محدودیت دستگاه‌های زمینی برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین در سطح وسیع، سنجش از دور حرارتی، تنها روش برآورد دمای تابشی سطح زمین با قدرت تفکیک زمانی و مکانی مناسب است (کی و همکاران، 2015). کاربری اراضی بر میزان دمای سطح زمین تأثیر می‌گذارد و به‌عنوان شاخصی برای بررسی روند آن قلمداد می‌شود (دانتری، 2010). میانگین دمای بازتابندگی سطح زمین در کاربری زراعی 25/21 درجه و در کاربری مرتع 22/02 درجه سلسیوس بود (شکل 4-ب). دلیل این امر را می‌توان به پایین بودن میزان پوشش-



شکل 4 - نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی (الف) و شاخص حرارتی (ب) در منطقه فندوقلو

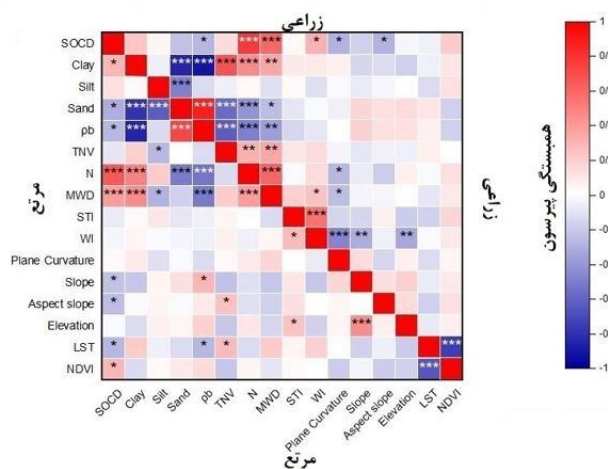
پوشش گیاهی، رطوبت قابل استفاده و حاصل‌خیزی خاک تأثیر مستقیم بر میزان کربن آلی خاک داشته باشد. از سویی دیگر میزان رس می‌تواند کربن آلی خاک را در برابر تجزیه محافظت کند.

انحنای سطح با تراکم کربن آلی خاک ( $P < 0/05$ ) و شاخص خیسی ( $P < 0/001$ ) همبستگی منفی معنی‌دار در کاربری زراعی نشان داد که بیان‌گر تجمع رس، ماده آلی و املاح در موقعیت‌های گود و هم‌گرا است. کراوچنکو و بالوک (2000) در مطالعه خود مشاهده کردند که کربن آلی خاک در گودی‌ها (سطوح مقعر) بیش‌تر است که به-صورت همبستگی منفی کربن آلی خاک با انحنای سطح مشخص می‌شود.

همچنین بین شاخص خیسی با تراکم کربن آلی خاک همبستگی مثبت معنی‌دار ( $P < 0/05$ ) در کاربری زراعی وجود داشت که افزایش در ظرفیت نگهداشت آب در مناطق با کربن آلی بالا را نشان می‌دهد و یا به عبارتی مناطقی که ذخیره رطوبتی بیش‌تری دارند، ماده آلی بیش-تری خواهند داشت.

تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون<sup>1</sup> برای ارزیابی رابطه بین تراکم کربن آلی خاک با ویژگی‌های زمینی و متغیرهای محیطی در دو کاربری مرتع و زراعی در شکل (5) آمده است. همبستگی مثبت و معنی‌داری ( $P < 0/001$ ) بین تراکم کربن آلی خاک با نیتروژن کل و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و همبستگی مثبت و معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) بین تراکم کربن آلی خاک با درصد رس و شاخص گیاهی تفاضل نرمال در کاربری مرتع وجود داشت. از سویی تراکم کربن آلی خاک همبستگی منفی معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) با درصد شن و وزن مخصوص ظاهری، درجه شیب، جهت شیب و دمای سطح زمین دارا بود. در کاربری زراعی، تراکم کربن آلی خاک همبستگی مثبت و معنی-داری ( $P < 0/001$ ) با نیتروژن کل و میانگین وزنی قطر خاکدانه و همبستگی مثبت و معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) با شاخص خیسی داشت. همچنین میزان تراکم کربن آلی خاک رابطه‌ای معنی‌دار و منفی‌داری ( $P < 0/05$ ) با وزن مخصوص ظاهری، انحنای سطح و جهت شیب در کاربری زراعی نشان داد. وانگ و همکاران (2010) ارتباط مثبت و معنی‌داری بین میزان کربن آلی و درصد رس در اراضی شیب‌دار شمال چین گزارش کردند، این پژوهشگران گزارش کرده‌اند که بافت خاک با تأثیر بر

<sup>1</sup> Pearson correlation



شکل 5 - ماتریس همبستگی تراکم کربن آلی خاک با ویژگی‌های زمینی و داده‌های محیطی در دو کاربری مرتع و زراعی منطقه فندوقلو (ستاره‌ها نشان‌گر:  $P < 0/001$ ،  $** P < 0/01$ ،  $* P < 0/05$ )

(SOCD تراکم کربن آلی خاک، Clay رس خاک، Silt سیلت خاک، Sand شن خاک، pb وزن مخصوص ظاهری خاک، TNV کربنات کلسیم معادل، N نیتروژن کل خاک، MWD میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، STI شاخص انتقال رسوب، WI شاخص خیسبی، Plan curvature انحناى سطح، Slope درجه شیب، Aspect slope جهت شیب، Elevation ارتفاع، LST دمای سطح زمین، NDVI شاخص گیاهی تفاضل نرمال)

جدول 2- مدل‌های رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام مربوط به کاربری مرتع و زراعی منطقه فندوقلو

نوع کاربری	مدل	F	خطای استاندارد	R <sup>2</sup>
مرتع	SOCD = 8/724 + 73/214 N + 31/180 NDVI + 20/510 MWD	24/00	9/22	0/53
زراعی	SOCD = 39/516 + 53/877 N - 4/695 Plan Curvature	9/38	10/25	0/46

کربن آلی خاک با تأثیر بر فعالیت میکروارگانیسم‌ها از طریق تأثیر بر دمای خاک و محتوای آب خاک، تجزیه کربن آلی خاک را کند یا تسریع بخشد.

از دیگر نکات مهم شکل (5) وجود همبستگی منفی و معنی‌دار ( $P < 0/05$ ) بین وزن مخصوص ظاهری خاک با تراکم کربن آلی خاک در کاربری‌های مرتع و زراعی بود. وزن مخصوص ظاهری یکی از شاخص‌های ارزیابی فشردگی خاک است، بنابراین در منطقه مورد مطالعه با افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک در اثر تغییر کاربری اراضی، فشردگی خاک افزایش و به علت کاهش پایداری خاکدانه موجب تضعیف کیفیت خاک شد.

در زمینه تأثیر درجه و جهت شیب بر میزان تجمع کربن آلی خاک، یاکشیچ و همکاران (2021) گزارش نمودند که توپوگرافی نقش مهمی در تعریف ویژگی‌های خاک با توجه به رژیم‌های حرارتی و رطوبتی دارد. مهم‌ترین تأثیر درجه شیب بر توسعه نیم‌رخ خاک، تأثیر آن بر رطوبت خاک است. درجه و جهت شیب با تأثیر بر میزان رطوبت خاک، جامعه گیاهی و دمای خاک در مقیاس کوچک‌تر می‌تواند میکروکلیمات‌هایی<sup>1</sup> ایجاد کند که به طور قابل توجهی با شرایط آب و هوایی منطقه‌ای متفاوت باشد. خاک‌های تحت آب و هوای گرم معمولاً به دلیل میزان معدنی شدن بالاتر نسبت به خاک‌های تحت آب و هوای خنک‌تر، حاوی مقدار کم‌تری کربن آلی خاک هستند. بنابراین، جهت و درجه شیب می‌تواند بر توزیع

<sup>1</sup> Microclimate

## رگرسیون خطی چند متغیره

انحنای سطح تغییرات سرعت جریان آب و فرآیندهای انتقال رسوب را منعکس می‌کند و به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان تراکم کربن آلی خاک است. انحنای سطح تمرکز توزیع جریان آب سطحی را تعیین می‌کند به گونه‌ای که در سطوح مقعر جریان آب متمرکز شده و نفوذ افزایش می‌یابد در حالی که در وضعیت‌های محدب جریان آب پخشیده شده و نفوذ کاهش می‌یابد (زوبرگن و همکاران، 1987). مولر و پیرس (2003) نیز کربن آلی خاک را با استفاده از مدل رگرسیون خطی چند متغیره و آنالیز سطح زمین برآورد کردند. در مدل‌های ارائه شده آنها نیز علاوه بر انحنای سطح، شیب و ارتفاع وارد مدل شدند. فیزوره و همکاران (2017) در مورد تأثیر فاکتورهای توپوگرافی بر میزان تجمع کربن آلی خاک از مدل رگرسیونی چند متغیره به روش گام‌به‌گام استفاده نمودند. معادله ارائه شده دارای ضریب تبیین برابر 44 درصد بین دو متغیر شیب و انحنای سطح با تجمع کربن آلی خاک در طول مناطق تپه‌ای را نشان داد.

شاخص گیاهی تفاضل نرمال برای ارزیابی پوشش گیاهی و پایش تغییرات پوشش گیاهی مناسب است (ژانگ و همکاران، 2019). NDVI بالاتر به معنی پوشش گیاهی بهتر و تراکم بیشتر تاج پوشش است که در نتیجه باعث افزایش تجمع کربن آلی می‌شود (جوباگی و جکسون، 2000؛ بهونیا و همکاران، 2017).

پایداری خاک‌دانه‌ها از جمله ویژگی‌های فیزیکی اساسی خاک است که بطور مستقیم و غیرمستقیم بر کیفیت خاک نقش اساسی دارد. بافت ریز خاک‌ها بر تجمع و الگوی معدنی شدن ذخیره کربن آلی خاک تأثیر می‌گذارند (پاندی و همکاران، 2010). ذرات ریز، همزمان به دو طریق بر کربن آلی خاک مؤثر هستند. از یک سو، با افزایش رس و سیلت، قدرت خاک در تامین و نگهداشت عناصر غذایی بیشتر می‌شود و حاصلخیزی خاک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در زمان تشکیل خاکدانه، ذرات رس با مواد آلی کمپلکس رس - هوموس

جدول (2) نتایج مدل رگرسیون خطی چند متغیره به روش گام‌به‌گام به صورت پیش‌رونده<sup>1</sup> برای برآورد تراکم کربن را نشان می‌دهد. ویژگی‌های خاک و داده‌های محیطی به عنوان متغیرهای مستقل و مقدار تراکم کربن آلی به عنوان متغیر وابسته مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (2) نشان داد که از میان کلیه متغیرهای مورد بررسی درصد نیتروژن کل (N)، شاخص گیاهی تفاضل نرمال (NDVI) و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) در کاربری مرتع به عنوان مؤثرترین متغیرهای برآورد کننده وارد مدل شدند. هر سه متغیر رابطه مثبتی با میزان تراکم کربن آلی خاک نشان داد. ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل رگرسیونی به دست آمده برای کاربری مرتع برابر با 53 درصد که بیانگر آن است که سه ویژگی درصد نیتروژن کل خاک، شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حدود 53 درصد تغییرات تراکم کربن آلی خاک را توجیه و تبیین می‌کنند. در مدل ارائه شده برای کاربری زراعی، دو متغیر درصد نیتروژن کل و انحنای سطح به عنوان مؤثرترین متغیرهای برآورد کننده وارد مدل شد. به طوری که با افزایش میزان درصد نیتروژن کل و کاهش انحنای سطح، مقدار تراکم کربن آلی خاک افزایش یافت. این مدل توانست 46 درصد تغییرات تراکم کربن آلی خاک را توجیه و تبیین کند. 47 و 54 درصد از تغییرات کربن آلی به ترتیب در کاربری مرتع و زراعی با این مدل‌ها بیان نشد که این مسئله احتمالاً به علت وجود روابط غیرخطی بین پدیده‌ها است که با این مدل‌های رگرسیونی در نظر گرفته نشده است.

درصد نیتروژن کل در هر دو مدل ارائه شده برای کاربری‌های مرتع و زراعی وارد مدل گردید. کربن و نیتروژن در اکوسیستم زمینی تعامل نزدیکی یا یکدیگر دارند و در اکثر زیست‌بوم‌ها عمدتاً با نیتروژن محدود می‌شود (جوباگی و جکسون، 2000).

<sup>1</sup> Forward

از ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی خاک سطحی است.

### روش‌های زمین آماری برآورد تراکم مکانی کربن آلی خاک

روش‌های زمین آماری مورد استفاده به منظور درون-یابی میزان تراکم کربن آلی خاک در این تحقیق شامل روش‌های کریجینگ معمولی (OK)، کوکریجینگ (CoK) و رگرسیون-کریجینگ (RK) بودند. در میان ویژگی‌های مربوط به خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و اقلیم در این مطالعه درصد نیتروژن کل بالاترین همبستگی را با میزان تراکم کربن آلی در کاربری‌های مرتع و زراعی نشان داد ( $r_{\text{مرتع}}=0/649$  و  $r_{\text{زراعی}}=0/745$ ).

همانطور که ملاحظه می‌شود (شکل 6) میزان تراکم کربن در نواحی شمال‌شرقی، مرکز و جنوب-شرقی منطقه زیاد و این تراکم به سمت غرب کاهش می‌یابد. این با تغییرات نقشه NDVI (شکل 4-الف) مطابقت داشت. هم‌چنین دریای مازندران در شرق منطقه قرار گرفته است و به نظر می‌رسد مناطق غربی بیش‌تر در معرض بارش‌ها و جریان‌های باد مرطوب از سمت دریای مازندران هستند.

دامنه تراکم کربن آلی خاک در دو روش OK و CoK بین 20/70-97/83 گرم بر سانتی‌متر مربع قرار دارد ولی این دامنه برای روش RK بین 38/35-78/87 گرم بر سانتی‌متر مربع بود. توزیع مکانی مشابهی از نظر تراکم کربن آلی خاک در بین این سه نقشه وجود دارد. اغلب کاربری در مناطق شرقی مرتع با پوشش گیاهی مناسب است و کاهش کربن آلی خاک با کاهش شاخص NDVI همسویی دارد.

تشکیل می‌دهد و مواد آلی را در مقابل تجزیه حفاظت می‌کند (بوشیازو و همکاران، 1991).

### نیم‌تغییرنمای داده‌های زمینی

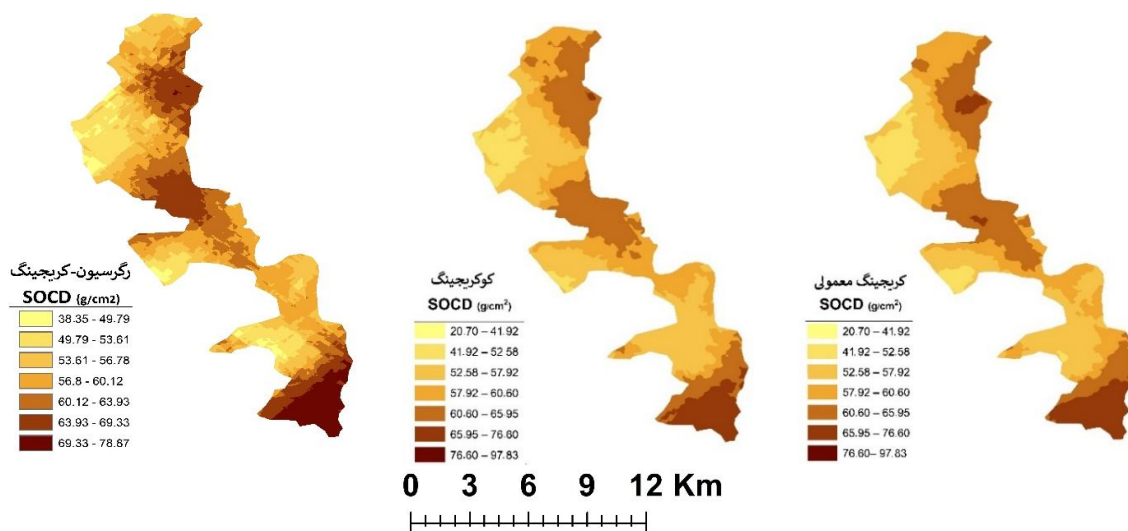
اولین گام در استفاده از روش کریجینگ بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها با استفاده از آنالیز واریوگرام است (نقی‌زاده مهرجردی و همکاران، 1391). پارامترهای مربوط به نیم‌تغییرنماها در جدول (3) آمده است، پس از برازش چندین مدل نیم‌تغییرنما، مدل مناسب از بین تمامی مدل‌ها با توجه به کم‌ترین اثر قطعه‌ای به عنوان بهترین مدل برای هر عامل انتخاب شد. طبق نتایج به‌دست آمده از جدول (3)، بالاترین اثر قطعه‌ای برای کربنات کلسیم معادل بود. مناسب‌ترین تغییرنمای برای همه ویژگی‌ها بجز شن کل مدل نمایشی بود. بالاترین دامنه تأثیر نیم-تغییرنما برای وزن مخصوص ظاهری و کم‌ترین آن مربوط به درصد کربن آلی بود.

از نسبت اثر قطعه به سقف<sup>1</sup> که معمولاً به صورت درصد ارائه می‌شود برای سنجش میزان همبستگی مکانی استفاده شد (جدول 2). چنانچه نسبت به‌دست آمده کم‌تر از 25 درصد باشد، متغیر دارای کلاس همبستگی مکانی قوی، بین 25 تا 75 درصد نسبت همبستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بیش‌تر از 75 درصد باشد، متغیر دارای کلاس همبستگی مکانی ضعیف خواهد بود (کامبردلا و همکاران، 1994). طبق نتایج به‌دست آمده از جدول 3، درصد نیتروژن کل دارای نسبت کم‌تر از 25 درصد بود که نشان دهنده وابستگی مکانی قوی این عامل است. بقیه ویژگی‌ها نیز که درصد همبستگی مکانی بین 25 تا 75 درصد داشتند در کلاس همبستگی مکانی متوسط قرار گرفتند. کربن آلی خاک در کل منطقه مورد مطالعه دارای نسبت همبستگی مکانی متوسط بود. موسوی و همکاران (1399) نیز برای میزان کربن آلی خاک کلاس همبستگی متوسط را گزارش نمودند. لیو و همکاران (2009) و فلاین و همکاران (2019) گزارش نمودند که مدل نمایشی مدل مناسبی برای بیان تغییرات مکانی بسیاری

<sup>1</sup> Nugget Effect on Sill Ratio

جدول 3- ویژگی‌های نیم‌تغییرنمای داده‌های زمینی در منطقه فندوقلو (تعداد=140)

پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه تأثیر (متر)	همبستگی مکانی (درصد)
رس	نمایی	0/38	0/63	2379	37
سیلت	نمایی	0/48	0/48	1288	50
شن کل	کروی	0/45	0/56	2040	45
وزن مخصوص ظاهری	نمایی	0/49	0/52	3230	48
میانگین وزنی قطر خاکانه	نمایی	0/57	0/40	1869	58
کربن آلی	نمایی	0/48	0/52	1020	48
نیتروژن کل	نمایی	0/22	0/77	2280	22
کربنات کلسیم	نمایی	0/60	0/41	1189	59



شکل 6- پهنه‌بندی میزان تراکم کربن آلی خاک به سه روش در منطقه فندوقلو در سال 1399

باشد؛ زیرا همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، برای حصول نتایج مطلوب در روش کریجینگ معمولی بایستی تراکم نقاط نمونه‌برداری بالا باشد (لیائو و همکاران، 2013).

مدل رگرسونی به‌دست آمده از روش کوکریجینگ که با متغیر کمکی درصد نیتروژن خاک محاسبه شد دارای ضریب تبیین برابر با 0/57 و ریشه میانگین مربعات خطا برابر با 8/91 بود. میزان میانگین خطا در این روش 0/3 بود. مدل کوکریجینگ توانسته 57 درصد از تغییرات تراکم کربن آلی خاک را در مقیاس زمین آمار توجیه کند. که با توجه به‌وسعت بالای منطقه مقادیر قابل اطمینانی است. ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا به‌دست آمده

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد سه روش OK، CoK و RK در دو کاربری مرتع و زراعی آماره های ME، RMSE و  $R^2$  مقایسه شدند (جدول 4). بر این اساس ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای مدل حاصل از روش کریجینگ معمولی به ترتیب 0/17 و 12/52 با میانگین خطای 0/03- بود که براساس نتایج آماری به‌دست آمده، برآورد قابل قبولی از مقدار تراکم کربن آلی خاک نیست و نشان داد که روش کریجینگ معمولی به تنهایی برای برآورد تغییرات مکانی تراکم ماده آلی خاک در منطقه مورد مطالعه کافی نیست و برای توصیف دقیق‌تر این تغییرات باید از متغیرهای کمکی نیز بهره گرفت. این مسأله ممکن است ناشی از تراکم پایین نقاط نمونه‌برداری



همکاران (1386) گزارش نمودند استفاده از یک متغیر کمکی در روش کوکریجینگ دقت برآوردها را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. ژو و لین (2010) نیز گزارش کردند که کوکریجینگ با متغیرهای مشخص برای درون‌یابی بهتر می‌توانند استفاده شوند. زو و آزیورن (2021) با بررسی تنوع مکانی در میزان کربن آلی و نیتروژن کل در جمهوری ایرلند با دو روش کریجینگ و کوکریجینگ گزارش نمودند که اکثر آماره‌های صحت-سنجی با استفاده از روش کوکریجینگ ارجحیت آن را بر روش کریجینگ معمولی نشان دادند. آنها دلیل دقت بالای روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ را مرتبط با ساختارهای متغیر مشابهی که بین کربن آلی و نیتروژن کل وجود دارد گزارش نمودند.

نتایج حاصل از ارزیابی مقاطع نشان داد که دقت روش رگرسیون-کریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ معمولی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته، به‌طوریکه این روش توانست 60 درصد از تغییرات مکانی تراکم ماده آلی خاک را توصیف کند. مقدار شاخص میانگین خطا در این روش نسبت به روش کریجینگ معمولی به اندازه کافی به صفر نزدیک شده که بیانگر عدم وجود خطاهای سیستماتیک در این روش است. ریشه میانگین مربعات خطا مدل رگرسیونی حاصل از روش رگرسیون-کریجینگ 8/70 بود.

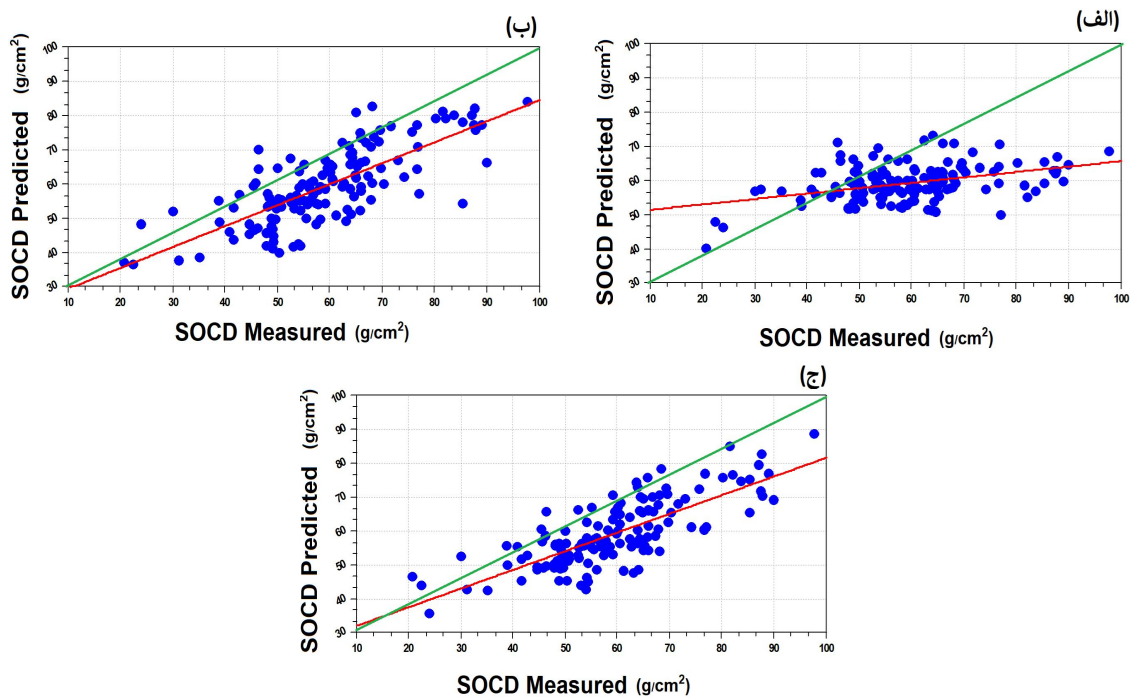
از روش کوکریجینگ نشان می‌دهد که متغیر کمکی به‌کار رفته (درصد نیتروژن کل) ارتباط بالایی با میزان تراکم کربن آلی خاک در منطقه از خود نشان داده است. کربن آلی خاک و نیتروژن کل شاخص‌های کلیدی برای برآورد کیفیت خاک هستند و به‌عنوان مخازن مهم کربن و نیتروژن عمل می‌کنند (بولین و همکاران، 2000). ماده آلی خاک منبع اصلی برای عنصر پرمصرف نیتروژن است و مقدار نیتروژن خاک نشأت گرفته از بقایای گیاهی و جانوری بوده به‌طوری‌که مواد آلی خاک به منزله انبار نیتروژن هستند. رابطه مثبت بین تراکم کربن آلی خاک با نیتروژن کل خاک با نتایج اصغری و همکاران (1394) مطابقت دارد. اصغری و همکاران (1394) نیز بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنی‌دار را بین کربن آلی خاک با نیتروژن کل ( $r=0/897$ ) را گزارش نمودند. وانگ و همکاران (2018) گزارش نمودند که مقدار نیتروژن کل همبستگی مثبت، قوی و معنی‌داری ( $P=0/01$ ) با مقدار کربن آلی خاک در سه کاربری (جنگل، مرتع و زراعی) در منطقه مورد مطالعه دارد. آن‌ها گزارش کردند که تراکم کربن آلی خاک به‌دلیل معدنی شدن کربن (تبدیل فرم کربن آلی به ترکیب معدنی) به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال، روند معدنی شدن کربن در خاک‌های غنی از نیتروژن کندتر است و منجر به غلظت بالای کربن آلی خاک می‌شود. جعفری و

جدول 4- آماره‌های صحت‌سنجی برای سه روش درون‌یابی تراکم کربن آلی خاک در

منطقه فندوقلو			
روش درون‌یابی	R <sup>2</sup>	RMSE	ME
کریجینگ معمولی (OK)	0/17	12/52	-0/03
کوکریجینگ (CoK)	0/57	8/91	0/30
رگرسیون-کریجینگ (RK)	0/60	8/70	-0/05

دقت بالای این روش را در برآورد تراکم کربن آلی خاک را نشان داد (شکل 7 -ج). نتایج این نمودارها نشان داد که استفاده از روش RK سبب می‌شود که مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده تراکم کربن آلی خاک به خط 1:1 نزدیک‌تر شده و از پراکندگی داده‌ها کاسته شود.

شکل (7) مقادیر تراکم کربن آلی خاک برآورد شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده این کمیت با سه روش درون‌یابی را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده تراکم کربن آلی خاک مورد آزمون در روش RK با مقادیر برآورد شده این کمیت نسبت به خط 1:1 توانایی و



شکل 7- مقادیر اندازه گیری شده تراکم کربن آلی خاک (SOC) در مقابل برآورد شده در روش کریجینگ معمولی (الف)، کوکریجینگ (ب) و رگرسیون-کریجینگ (ج) (تعداد=140) در منطقه فندوقلو (خط قرمز: خط برازش داده شده و خط سبز: خط 1:1)

### نتیجه گیری کلی

وقت و تکنسین کارآموده آزمایشگاهی دارد که از موارد منفی استفاده از این مشخصه برای برآورد مقدار کربن آلی خاک است. روش رگرسیون-کریجینگ توانست 60 درصد از تغییرات تراکم کربن آلی خاک را توصیف کند لذا، رگرسیون-کریجینگ را به عنوان مناسب ترین روش از بین روش های انجام شده پیشنهاد می شود. با توجه به پیچیدگی روابط بین تراکم کربن آلی خاک با عوامل کنترل کننده مقدار این ویژگی در منطقه فندوقلو پیشنهاد می شود از عوامل مدیریتی و انسانی که تأثیر به سزایی در پویایی کربن آلی خاک به خصوص در اراضی زراعی دارد نیز به عنوان متغیرهای کمکی بهره گرفته شود و دیگر روش های درونبایی نیز جهت به دست آوردن نتایج کامل تر استفاده شود.

در این پژوهش با استفاده از سه روش کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و رگرسیون-کریجینگ تغییرات مکانی تراکم کربن آلی خاک در منطقه فندوقلو در استان اردبیل برآورد شد. استفاده همزمان از متغیرهای زمینی و داده های محیطی به عنوان متغیر کمکی دقت روش کریجینگ را برای درونبایی تراکم کربن آلی خاک به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش داد. نکته مهم در پهنه بندی به روش کوکریجینگ استفاده از داده های کمکی خاک و یا محیطی برای برآوردها است. در این پژوهش نیتروژن کل خاک به عنوان یک مشخص مهم خاک مورد استفاده قرار گرفت و کیفیت پهنه بندی را نسبت به کریجینگ معمولی بالا برد. اندازه گیری نیتروژن خاک نیاز به هزینه، صرف

## فهرست منابع:

1. اشرفی، ع. و م. ا. علیمی. 1393. مقایسه روش‌های مختلف تهیه مدل ارتفاع رقومی مورد شناسی: حوضه آبخیز نوفرست، شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی. جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای، 13: 140-119.
2. اصفری، ش.، س. هاشمیان صوفیان، ا. گلی کلانپا، و م. محب‌الدینی. 1394. اثرات تغییر کاربری اراضی بر شاخص‌های کیفیت خاک در شرق استان اردبیل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 22(3): 1-19.
3. پیله‌ور شهری، ا. ر.، ش. ا. ایوبی، و ح. خادمی. 1389. مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره در پیش‌بینی کربن آلی خاک به کمک داده‌های آنالیز سطح زمین (مطالعه موردی: منطقه ضرغام آباد سمیرم). نشریه آب و خاک، 24(6): 1151-1163.
4. تقی‌زاده مهرجردی، ر.، ف. سرمیدیان، م. امید، غ. ثوابقی، م. ج. روستا، و م. ج. رحیمیان. 1391. پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار و دستگاه القاءگر الکترومغناطیس در منطقه اردکان. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، 26(4): 369-380.
5. تیمورزاده، ع. ا. قربانی، و ا. ح. کاویان‌پور. 1394. بررسی فلور، شکل زیستی و کورولوژی گیاهان جنگل‌های جنوب-شرقی شهرستان نمین (اسیقران، فندوقلو، حسنی و بوبینی) در استان اردبیل. مجله پژوهش‌های گیاهی، 28(2): 264-275.
6. جعفری، م.، ح. عسگری، م. معظمی، م. بی‌نیاز، و م. طهمورث. 1387. بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات خاک با کاربرد روش‌های زمین‌آمار. پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، 80: 176-185.
7. جمالی، ز.، م. اونق، و ع. سلمان ماهینی. 1398. تحلیل ارتباط دمای سطح زمین با کاربری اراضی و شاخص اختلاف گیاهی نرمال‌شده در دشت گرگان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا. 23(3): 175-194.
8. جوان، ف.، ح. حسنی‌مقدم، و ح. ترابی. 1399. ارزیابی روند تخریب اراضی جنگلی با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی (مورد مطالعه: جنگل‌های فندوقلو شهرستان نمین). فصل‌نامه علمی محیط زیست و توسعه فراهخشی، 5(69): 63-74.
9. عطائیان، ب.، ش. شجاعی‌فر، و. زندیه، و س. هاشمی. 1396. بررسی تغییرات کربن آلی خاک در دو منطقه بحرانی و آسیب پذیر مراتع دشت قهاوند با استفاده از سنجش از دور و GIS. سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، 8(4): 76-90.
10. موسوی، س.، ر.، ف. پارسایی، ا. رحمانی، م. ح. سدری، و م. کوهسار بوستانی. 1399. پیش‌بینی مکانی برخی از ویژگی‌های خاک سطحی با استفاده از مدل‌های درون‌یابی و یادگیری ماشین. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، 10(3): 27-49.
11. Barsi, J. A., J. R. Schott., S. J. Hook., N. G. Raqueno., B. L. Markham., and R. G. Radocinski. 2014. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. Remote Sen, 6(11): 11607-11626.
12. Bhunia, G.S., P. K. Shit., and H. R. Pourghasemi. 2017. Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model. Geocarto Int, 1-12.
13. Bolin, B., and R. Sukumar. 2000. Global perspective: In land use, land-use change, and forestry; Watson, R. T., Nobal, I. R., Bolin, B., Racindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D. J., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 23-51.
14. Bongiovanni, M. D., and J. C. Lobartini. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro-and microaggregates as affected by cultivation. Geoderma, 136(3-4): 660-665.

15. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron J.* 54: 464-465.
16. Buschiazzo, D. E., A. R. Quiroga., and K. Stahr. 1991. Patterns of organic matter accumulation in soil of the semiarid Argentinean Pampas. *Z Pflanz Bodenkunde*, 154: 437-441.
17. Cahn, M. D., J. W. Hummel., and B. H. Brouer. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *SSSAJ*, 58: 1240-1248.
18. Cambardella, C. A., T. B. Moorman., J. M. Novak., T. B. Parkin., D. L. Karlen., R.F. Turco., and A. E. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *SSSAJ*, 58: 1501-1511.
19. Conforti, M., G. Matteucci., and G. Buttafuoco. 2017. Organic carbon and total nitrogen topsoil stocks, biogenetic natural reserve Marchesale (Calabria region, southern Italy). *J. Maps*, 13: 91-99.
20. Davidson, E. A., and I. A. Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440: 165-173.
21. De Vos, B., S. Lettens., B. Muys., and J. A. Deckers. 2007. Walkley-Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use Manage.* 23: 221-229.
22. Dontree, S. 2010. Relation of land surface temperature (LST) and land use/land cover (LULC) from remotely sensed data in Chiang Mai— Lamphun basin. In SEAGA conference.
23. Dubrule, O. 1983. Cross validation of kriging in a unique neighborhood. *Math Geol*, 15(6): 687-699.
24. Fang, X., Z. Xue., B. Li., and S. An. 2012. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena*, 88: 6-13.
25. Fenton, G., K. R. Helyar., and P. Orchard. 1993. Soil acidity and liming. *NSW Agriculture Agfact AC 19*.
26. Fissore, C., B. J. Dalzell., A. A. Berhe., M. Voegtler., M. Evans., and A. Wu. 2017. Influence of topography on soil organic carbon dynamics in a Southern California grassland. *Catena*, 149, 140-149.
27. Florinsky, I. V. 2012. *Digital terrain analysis in soil science and geology*, Elsevier/Academic Press.
28. Flynn, T., W. de Clercq., A. Rozanov., and C. Clarke. 2019. High-resolution digital soil mapping of multiple soil properties: an alternative to the traditional field survey. *J. Plant. Nutr. Soil. Sc.* 237-247.
29. Gia Pham, T., M. Kappas., C. Van Huynh., and L. Hoang Khanh Nguyen. 2019. Application of ordinary kriging and regression kriging method for soil properties mapping in hilly region of central Vietnam. *ISPRS Int. J. Geoinf.* 8(3): 147.
30. Geissen, V., R. Sánchez-Hernández., C. Kampichler., R. Ramos-Reyes., A. Sepulveda-Lozada., S. Ochoa-Goana., B. H. de Jong., E. Huerta-Lwanga., and S. Hernández-Daumas. 2009. Effects of land use change on some properties of tropical soils-an example from southeast Mexico. *Geoderma*, 151: 87-97.
31. Hazelton, P., and B. Murphy. 2007. *Interpreting soil test results*. CSIRO publishing. pp:169.
32. Hengel, T., G. B. M. Heuvelink., and A. Stein. 2004. Generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120: 75-93.
33. Hosseini, M., S. A. Movahedi Naeini., A. A. Dehghani., and Y. Khaledian. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. *Soil Tillage Res.* 157: 32-42.

34. Isaaks, E. H., and R. M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics; Oxford University Press: New York, NY, USA.
35. Jakšić, S., J. Ninkov., S. Milic., J. Vasin., M. Živanov., D. Jakšić., and V. Komlen. 2021. Influence of slope gradient and aspect on soil organic carbon content in the region of Niš, Serbia. *Sustainability*, 13(8332):1-17.
36. Jobbágy, E. G., and R. B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl*, 10, 423–436.
37. John, K., I. A. Isong., N. M. Kebonye1., P. C. Agyeman., A. E. Okon., and A. S. Kudjo. 2021. Soil organic carbon prediction with terrain derivatives using geostatistics and Sequential Gaussian simulation. *JSSAS*, 1-32.
38. Ke, Y., J. Im., J. Lee., H. Gong., and Y. Ryu. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and insitu observations. *Remote Sens. Environ*, 164: 298-313.
39. Kemper, W. D., and R. C. Rosenau. 1986. Methods of soil analysis. Part 1. physical and mineralogical methods. *Agronomy Monograph No. 9* (2nd Edition).
40. Kravchenko, A. N., and D. G. Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J*, 92:75–83.
41. Lefèvre C., F. Rekik., V. Alcantara., and L. Wiese. 2017. Soil organic carbon the hidden potential. *FAO Publishing*.
42. Le Quere, C. 2015. Global carbon budget. 2014. *Earth Syst. Sci. Data*, 7: 47–85.
43. Liao, K., S. Xu., J. Wu., and Q. Zhu. 2013. Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci*, 59(4): 488-500.
44. Liu, Zh. P., M. A. Shao., and Y. Q. Wang. 2112. Estimating soil organic carbon across a large-scale region: a state-space modeling approach. *J. Soil Sci*, 111: 611-618.
45. Liu, J., B. Shi., H. Jiang., S. Bae., and H. Huang. 2009. Improvement of waterstability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers. *Catena*, 77(3): 175-179.
46. Matejovic, I. 1995. Total nitrogen in plant-material determined by means of dry combustion-a possible alternative to determination by Kjeldahl digestion. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal*, 26: 2217-2229.
47. Meng, Q. 2014. Regression kriging versus geographically weighted regression kriging versus geographically weighted regression for spatial interpolation. *Int. J. Adv. Remote Sens. GIS*, 3: 606–615.
48. Mitasova, H., J. Hofierk., M. Zlocha., and L. Iverson. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. J. Geogr. Inf. Sci*, 10(5): 629-641.
49. Moore, I. D., P. E. Gessler., G. A. Nielsen., and G. A. Peterson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *SSSAJ*. 57: 443–452.
50. Muchena, R. 2017. Estimating soil carbon stocks in a dry miombo ecosystem using remote sensing. *Chesa Forest Res Stat*, 6: 2-6.
51. Mueller, T. G., and F. J. Pierce. 2003. Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *SSSAJ*, 67: 258–267.
52. Pandey, C. B., S. K. Chaudhari., J. C. Dagar., G. B. Singh., and R. K. Singh. 2010. Soil N mineralization and microbial biomass carbon affected by different tillage levels in a hot humid tropic. *Soil Tillage Res*, 110: 33-41.
53. Radocaj, D., I. Jug., V. Vukadinovic., M. Jurišić., and M. Gašparovic. 2021. The effect of soil sampling density and spatial autocorrelation on interpolation accuracy of chemical soil properties in arable cropland. *J. Agron*, 11(2430): 1-15.
54. Rouse, J. W., R. H. Haas., J. A. Schell., and D.W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington DC, 10-14 December, 309-317.

55. Sarmadian, F., A. Keshavarzi., A. Rooien., M. Iqbal., G. Zahedi., and H. Javadikia. 2014. Digital mapping of soil phosphorus using multivariate geostatistics and topographic information. *Aust. J. Crop Sci*, 8: 1216–1223.
56. Shields, M. D., and J. Zhang. 2016. The generalization of Latin hypercube sampling. *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 148: 96–108.
57. Smith, P. 2004. Soils as carbon sinks—The global context. *Soil Use Manage*. 20: 212–218.
58. Sun, W., B. Minasny., and A. McBratney. 2012. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. *Geoderma*, 171(172): 16–23.
59. Taghizadeh-Mehrjardi, R., K. Nabiollahi., and R. Kerry. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 266: 98–110.
60. Templeton, G. F. 2011. A two-step approach for transforming continuous variables to normal: implications and recommendations for IS research. *Commun. Assoc. Inf. Syst*, 28 (4):41-58.
61. Waga, K., J. Malinen., and T. Tokola. 2020. A topographic wetness index for forest road quality assessment: An application in the lakeland region of Finland. *Forests*, 11(11):1-13.
62. Wang, S., Q. Zhuang., S. Jia., X. Jin., and Q. Wang. 2018. Spatial variations of soil organic carbon stocks in a coastal hilly area of China. *Geoderma*, 314: 8–19.
63. Wang, Y., B. Fu., Y. Lu., Ch. Song., and Y. Luan. 2010. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Quat. Res*, 73: 70–76.
64. Wang, B., W. Zhou., S. Ma., S. Liu., L. Yu., C. Zheng., and J. Wang. 2012. Regression-kriging of soil organic matter using the environmental variables derived from MODIS and DEM. *J. Agric. Sci. Technol*, 13(4): 838-842.
65. Wu, Z., Y. Liu., G. Li., Y. Han., X. Li., and Y. Chen. 2022. Influences of environmental variables and their interactions on Chinese farmland soil organic carbon density and its dynamics. *Land*, 11(208):1-16.
66. Wu, C., J. Wu., Y. Luo., L. Zhang., and S. D. De Gloria. 2009. Spatial prediction of soil organic matter content using cokriging with remotely sensed data. *SSSAJ*, 73: 1202–1208.
67. Xu, Y., S. E. Smith., S. Grunwald., A. Abd-Elrahman., S. P. Wani., and V. D. Nair. 2018. Estimating soil total nitrogen in smallholder farm settings using remote sensing spectral indices and regression kriging. *Catena*, 163: 111–122.
68. Yevheniya, V., N. Jenny., R. Lars., and T. Norberg. 2014. A minimum data set for evaluating the ecological soil functions in remediation projects. *J. Soils Sediments*, 14: 1850–1860.
69. Zevebergen, L. W., and C. R. Thorne. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surf Process Lan*, 12: 47-56.
70. Zhang, Y., L. Guo., Y. Chen., T. Shi., M. Luo., Q. Ju., and S. Wang. 2019. Prediction of soil organic carbon based on Landsat 8 monthly NDVI data for the Jiangnan plain in Hubei province, China. *Remote Sen*, 11(14): 1683-1695.
71. Zhu, Q., and H. S. Lin. 2111. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere*, 21: 514-616.
72. Zou, J., and B. Osborne. 2021. Spatially related sampling uncertainty in the assessment of labile soil carbon and nitrogen in an Irish forest plantation. *Appl. Sci*, 11(2139): 1-13.

۷۳. منابع اینترنتی:

74. <https://www.earthexplorer.usgs.gov/>
75. <https://www.ncc.gov.ir/>
76. <http://www.nsiswri.ir/>
77. <https://www.rsgisc.com/>

## Investigating the Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Fandooqlo Region of Ardabil Province, Iran

M. Behtari, M. Naderi Khorasani<sup>1</sup>, and A. Karimi

PhD Student of Soil Resource Management, Shahrekord University;

E-mail: mehran.behtari@gmail.com

Associate Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University;

E-mail: khnaderi@yahoo.com

Assistant Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Shahrekord University;

E-mail: karimiahmad1342@sku.ac.ir

Received: September, 2022 , and Accepted: February, 2023

### Abstract

Estimating the amount of soil organic carbon on a regional scale determines the potential of a landscape soil as a carbon storage site. This study was carried out in the Fandooqlo Region, Ardabil Province, Iran, and aimed to introduce: (i) the most suitable soil and environment characteristics as ancillary data for estimating soil organic carbon density (SOCD) and (ii) the most appropriate method for mapping SOCD among ordinary kriging (OK), co-kriging (CoK) and regression-kriging (RK) models. To fulfil the objectives, geographic information systems' database of the study area was developed by introducing soil, topographic and satellite data in the first step. Next, using Latin Hypercube (LHC) techniques and soil, land use, and geology maps and 140 sites were determined in the study area for collecting surficial (0-15 cm) compound soil samples. Results indicated that the land use type significantly affected SOCD ( $P \leq 0.01$ ) and SOCD of rangelands was higher than of croplands. Soil total nitrogen and mean weight diameter (MWD) were significantly ( $P \leq 0.001$ ) correlated with SOCD and could be applied as ancillary data for estimation of SOCD. Statistical indices revealed that application of co-kriging along with total soil nitrogen as ancillary data improved SOCD mapping compared with ordinary kriging. In general, this research indicated that regression-kriging was the most efficient method for mapping SOCD and total soil nitrogen, MWD, normalized difference vegetation index (NDVI) and plane curvature were significant soilscape characteristics that affect SOCD distribution.

**Keywords:** Ancillary data, Total soil nitrogen, Ordinary kriging, Co-kriging, Regression-kriging

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Shahr-e-Kord, University of Shahr-e-Kord, Faculty of Agriculture, Department of soil science