DOI: 10.22059/ijswr.2018.243639.667772 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۵، آذر و دی ۱۳۹۷ (ص ۱۱۱۷-۱۱۰۷)

Assessment of Soil Organic Matter Status using Regression Kriging Technique and Landsat Images

MOHAMMAD ALI MAHMOODI[1], MOLOD MIRZAIE[2], MAHTAB PIR BAVAGHAR[3]

1. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2. Graduated M.Sc. Student, Department of Soil Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
3. Associated Professor, Department of Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

(Received: Oct. 28, 2017- Revised: Feb. 28, 2018- Accepted: March. 11, 2018)

ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) is an important soil quality factor that affects physical, chemical and biological properties of the soil. Accurate estimation of SOM spatial variabilities provides critical information especially in precision agriculture. The objective of this study was to estimate SOM spatial variabilities and to assess its status using regression kriging (RK) in Ghorveh plain in Kurdistan province (Iran). Therefore, 150 soil samples from a depth of 0-15 cm were taken systematically in a grid spaced 2 Km × 2 Km. Particle size distribution and SOM content of the soil samples were measured in the laboratory. Stepwise multiple linear regressions (MLR) was used to estimate SOM variabilities based on the soil texture data (percentages of sand, silt and clay) and vegetation indices obtained from Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) imagery. The MLR model was used to provide an initial map of SOM content. Furthermore, the residuals of MLR model were interpolated using ordinary kriging (OK) and they were combined with the initial map of SOM to produce the final map of RK SOM. The SOM status map was derived from overlaying of soil texture and SOM maps in four different levels (very low, low, medium and high). The results of MLR indicated that both clay content and soil adjusted vegetation index (SAVI) variables have a significant effect on SOM content ($p < 0.05$). The cross-validation results indicated that the RK method was able to explain about 84% of the spatial variabilities of SOM. The SOM status map indicated that more than 96% of the soil in the proposed region is in a low condition in terms of organic matter.

Key Words: spatial variability, soil adjusted vegetation index, remote sensing

Archive of SID

www.SID.ir

ارزیابی وضعیت مادهٔ آلی خاک با استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ و تصاویر ماهوارهٔ لندست

محمدعلی محمودی[۱]*، مولود میرزایی[۲]، مهتاب پیرباوقار[۳]

۱. استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

۳. دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

(تاریخ ارسال: ۶/ ۸/ ۱۳۹۶- تاریخ بازنگری: ۸/ ۱۲/ ۱۳۹۶- تاریخ تصویب: ۲۰/ ۱۲/ ۱۳۹۶)

چکیده

مادهٔ آلی یکی از فاکتورهای مهم کیفی خاک است که تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک دارد. برآورد دقیق تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک بویژه در کشاورزی دقیق الزامی است. هدف از این پژوهش برآورد تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک و وضعیت آن با استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ در اراضی دشت قروه در استان کردستان می‌باشد. بدین منظور تعداد ۱۵۰ نمونهٔ خاک به روش سیستماتیک با فواصل ۲×۲ کیلومتر از عمق ۰ تا ۱۵ سانتیمتری جمع‌آوری شد. توزیع اندازهٔ ذرات و مقدار مادهٔ آلی خاک‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیرهٔ گام به گام رابطهٔ بین مقدار مادهٔ آلی و داده‌های بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس) و شاخص‌های پوشش گیاهی، بدست آمده از تصاویر ماهوارهٔ لندست ۸، بدست آمد. به کمک مدل بدست آمده نقشهٔ اولیهٔ مادهٔ آلی خاک تهیه شد. سپس مقدار باقیمانده‌های مدل رگرسیونی با روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شد که پس از ادغام آن با نقشهٔ اولیه، نقشهٔ نهایی مادهٔ آلی خاک بدست آمد. نقشهٔ وضعیت مادهٔ آلی خاک از همپوشانی نقشهٔ مادهٔ آلی خاک با نقشهٔ بافت خاک در چهار کلاس خیلی کم، کم، متوسط و زیاد بدست آمد. نتایج حاصل از رگرسیون خطی چند متغیره نشان داد که متغیرهای درصد رس و شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده (SAVI) اثر معنی‌داری بر روی مقدار مادهٔ آلی خاک داشتند ($P < ۰/۰۵$). بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی متقاطع روش رگرسیون کریجینگ توانست ۸۴ درصد از تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک را توصیف کند. نقشهٔ وضعیت مادهٔ آلی خاک نشان داد که بیش از ۹۶ درصد از خاک‌های منطقه از نظر مادهٔ آلی در وضعیت کم قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده

مقدمه

توانایی خاک برای تأمین مواد غذایی مورد نیاز گیاه، نگهداشت آب و مقاومت در برابر فرسایش به شدت با کمیت و کیفیت مواد آلی موجود در آن ارتباط دارد (Lal, 2007). بعلاوه، افزایش مادهٔ آلی خاک نقش مهمی در کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری و جلوگیری از تغییرات اقلیمی دارد (Yadav and Malanson, 2007).

بسیاری از ویژگی‌های خاک‌ها مانند بافت خاک، مادهٔ آلی، عمق خاک، شیب زمین و ... با مکان تغییر می‌کنند. اینگونه تغییرات مکانی ممکن است موجب تغییراتی در مصرف نهاده‌های زراعی و نیز عملکرد گیاهان زراعی شود. در کشاورزی دقیق که گاهی آن را کشاورزی مکان محور نیز می‌نامند، مدیریت زراعی با این تغییرات مکانی تطبیق داده می‌شود. در این روش عملکرد گیاهان زراعی به حداکثر می‌رسد و در ضمن مصرف بیش از اندازهٔ نهاده‌های زراعی مانند کودها و آفت‌کشها به حداقل کاهش می‌یابد. از این‌رو، مدیریت صحیح زراعی در کشاورزی دقیق نیازمند شناخت و پیش‌بینی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک از جمله مقدار مادهٔ آلی خاک است.

روش اصلی برای تعیین تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک نقشه‌برداری صحرایی است. این کار معمولاً با جمع‌آوری نمونه‌های خاک به روش تصادفی یا سیستماتیک صورت می‌گیرد. اگر تعداد کافی نمونه جمع‌آوری گردد، می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی نقشهٔ مادهٔ آلی خاک را تهیه کرد. روش‌های درون‌یابی مختلفی وجود دارند. این روش‌ها بطور کلی شامل روش‌های آماری کلاسیک و روش‌های زمین‌آماری می‌باشند. در مقایسه با روش‌های آمار کلاسیک روش‌های زمین‌آماری ضمن در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط اندازه‌گیری شده و ارتباط بین آن‌ها و همچنین همبستگی بین خصوصیات مختلف معمولاً کارایی بیشتری برای توصیف الگوی

* نویسندهٔ مسئول: a.mahmoodi@uok.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

تغییرپذیری خصوصیات خاک دارند (Burgess and Webster, 1980; Burrough, 1986; McBratney and Webster, 1986). تکنیک اصلی در روش‌های زمین‌آماری کریجینگ است که بهترین تخمین خطی غیراریب از یک متغیر مکانی را بدست می‌دهد. Marchetti *et al*. (2012) با استفاده از روش کریجینگ معمولی با مدل نیم‌تغییرنمای کروی تغییرات مکانی توزیع اندازهٔ ذرات خاک و مقدار مادهٔ آلی خاک را در منطقه‌ای در مرکز ایتالیا با اقلیم مدیترانه‌ای بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که بیشتر خاک‌های این مناطق دارای مقدار مادهٔ آلی کمی می‌باشند.

نتایج روش کریجینگ زمانی رضایت‌بخش است که تعداد نمونه‌ها کافی باشند. این امر هزینه و زمان نقشه‌برداری را افزایش می‌دهد. معمولاً برای اجتناب از این مشکل از دیگر روش‌های زمین‌آماری مانند کوکریجینگ یا رگرسیون کریجینگ استفاده می‌شود. در این روش‌ها علاوه بر متغیر اصلی از یک یا چند متغیر کمکی زودیافت که دارای رابطهٔ تبعی بالایی با متغیر اصلی بوده و تراکم نقاط آنها نیز در منطقه بالاست، جهت توصیف تغییرات مکانی متغیر اصلی استفاده می‌شود (Liao *et al*, 2013).

کوکریجینگ در واقع نوعی کریجینگ توسعه یافته است که در آن از رابطهٔ بین متغیر اصلی با یک یا چند متغیر کمکی برای درون‌یابی متغیر اصلی استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که روش کوکریجینگ دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ دارد (Vauclin *et al*, 1983; Istok *et al*., 1993; Wu *et al*., 2009). با این حال چنانچه متغیر اصلی همبستگی بالایی با متغیرهای کمکی نداشته باشد، روش کوکریجینگ دقت چندان بالاتری نسبت به روش کریجینگ نخواهد داشت (Shouse *et al*, 1990; Triantafilis *et al*, 2001). Yates and Warrick (1987) پیشنهاد کرده‌اند که در صورتیکه ضریب همبستگی بین متغیرها ۰/۵ و بیشتر باشد و تراکم نمونه‌برداری متغیر کمکی بالا باشد، روش کوکریجینگ دقت بالاتری نسبت به روش کریجینگ خواهد داشت.

در سال‌های أخیر استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ برای توصیف تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در روش رگرسیون کریجینگ ابتدا با استفاده از روش‌های رگرسیونی رابطهٔ بین متغیر اصلی با متغیرهای کمکی بدست می‌آید. با استفاده از مدل بدست آمده نقشهٔ اولیهٔ متغیر اصلی تهیه می‌شود. سپس مقدار باقیمانده‌ها با استفاده از کریجینگ معمولی درون‌یابی می‌شود. در نهایت نقشهٔ نهایی متغیر اصلی از جمع نقشهٔ اولیه با نقشهٔ باقیمانده‌ها بدست می‌آید. Odeh *et al* (1995) از این تکنیک برای برآورد ویژگی‌های خاک‌ها با استفاده از پارامترهای سرزمین استفاده کرده‌اند. Eldeiry and Garcia (2009) کارایی روش‌های رگرسیون کریجینگ و کوکریجینگ را برای برآورد شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با هم مقایسه کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ نسبت به روش کوکریجینگ به دلیل به دام انداختن تغییرات ریزتر دقت بیشتری در برآورد شوری خاک دارد.

داده‌های سنجش از دور مانند داده‌های بدست آمده از ماهوارهٔ لندست می‌تواند متغیر کمکی مفیدی برای پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های خاک‌ها باشد. بعنوان مثال Chen *et al* (2000) از داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی مادهٔ آلی خاک استفاده کرده‌اند. همچنین Ben-Dor *et al* (2008) نیز از روش‌های سنجش از دور برای ارزیابی شوری خاک در مقیاس صحرایی استفاده کرده‌اند.

بطور کلی اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱) ارزیابی کارایی برخی از پارامترهای بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و نیز بافت خاک برای پیش‌بینی تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک، ۲) برآورد تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ و ۳) ارزیابی وضعیت مادهٔ آلی خاک در بخشی از اراضی دشت قروه در استان کردستان.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

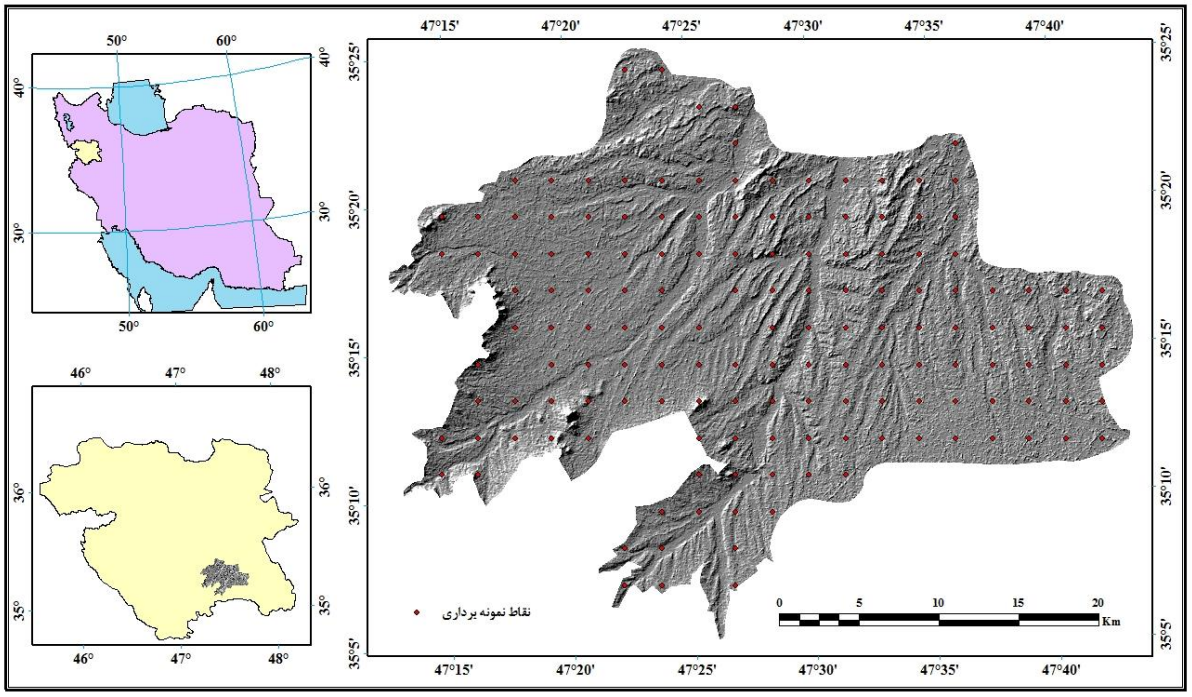
منطقهٔ مورد مطالعه بخشی از اراضی دشت قروه در استان کردستان در غرب ایران با مساحتی در حدود ۸۷ هزار هکتار است که در محدودهٔ جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). اراضی این منطقه عمدتاً تپه‌ای و دارای کاربری کشاورزی (آبی و دیم) می‌باشند. رژیم حرارتی خاک‌های این منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آنها زریک است.

نمونه‌برداری و تجزیه‌های خاک

نمونه‌برداری از خاک‌های منطقهٔ مطالعاتی در تابستان سال ۱۳۹۳ صورت گرفت. در مجموع تعداد ۱۵۰ نمونهٔ خاک به روش سیستماتیک (شبکه‌ای) با فواصل منظم ۲×۲ کیلومتر جمع‌آوری شد (شکل ۱). بدیهی است هر چه تعداد و تراکم نمونه‌ها بیشتر باشد، دقت روش‌های درون‌یابی و به تبع آن نقشه‌های تولید شده نیز بیشتر خواهد بود. اما از طرف دیگر این امر

Archive of SID
www.SID.ir

هزینهٔ انجام کار را بالا می‌برد. لذا با در نظر گرفتن هزینه‌های اجرایی طرح و نیز نتایج مطالعات قبلی فاصلهٔ نمونه‌برداری طوری تعیین شد که حتی‌الامکان بتوان با استفاده از داده‌های کمکی مانند داده‌های بافت خاک و داده‌های سنجش از دور به حداقل دقت مورد نیاز برای تهیهٔ نقشهٔ مادهٔ آلی خاک دست یافت.



شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

در هر نقطه تعداد ۶ نمونه در دایره‌ای به شعاع ۱ متر از عمق ۰ تا ۲۰ سانتیمتری برداشته شد. سپس نمونه‌ها با هم مخلوط شدند و یک نمونهٔ مرکب بعنوان معرف آن نقطه بدست آمد. نمونه‌ها در دمای آزمایشگاه هوا خشک شدند و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. توزیع اندازهٔ ذرات خاک‌ها به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986) و مقدار مادهٔ آلی آنها نیز به روش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد. در این مطالعه وضعیت مقدار مادهٔ آلی خاک‌ها با توجه به کلاس بافتی آنها در ۴ سطح خیلی کم، کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شده است که معیارهای این طبقه‌بندی در جدول (۱) آورده شده است (SILPA,1999).

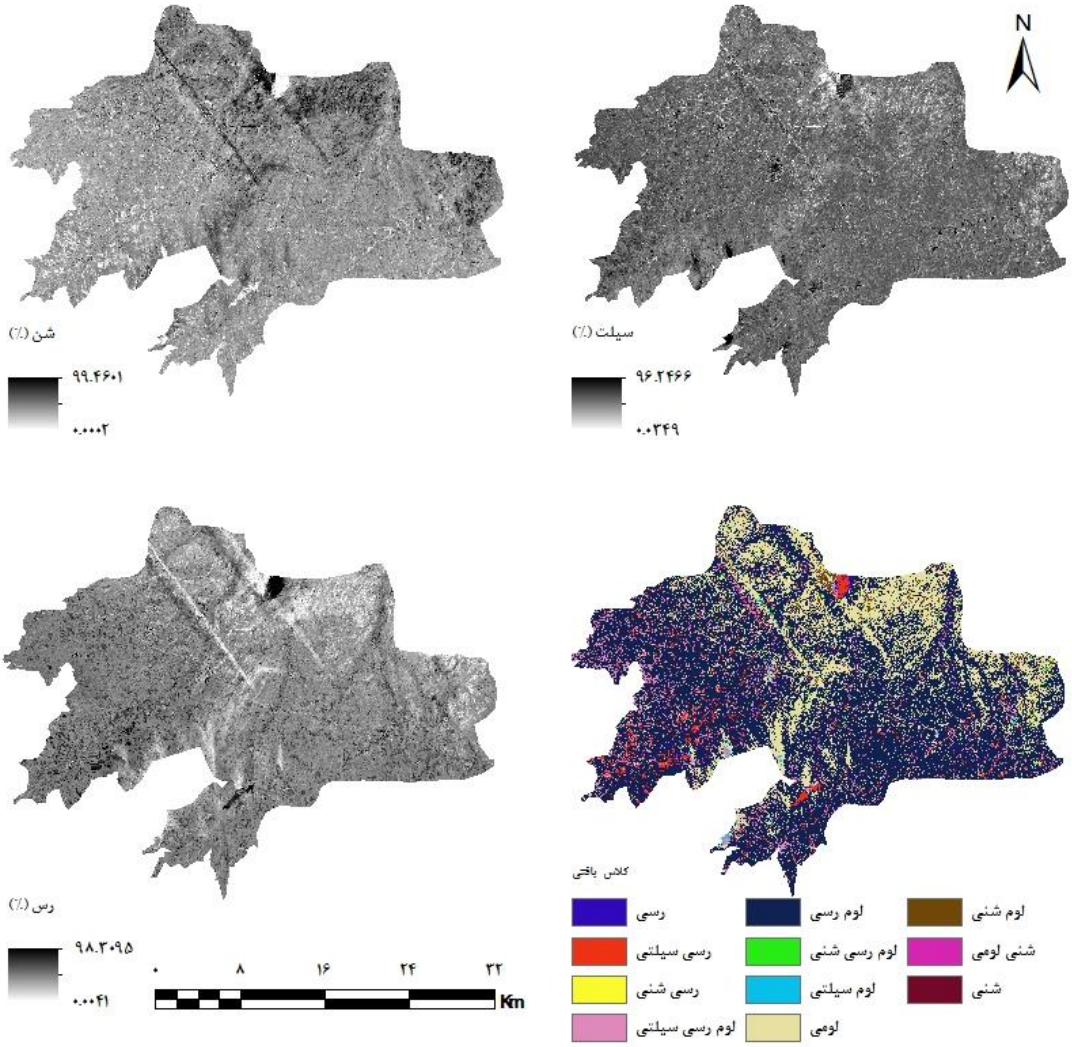
جدول ۱. ارزیابی وضعیت مادهٔ آلی خاک بر اساس کلاس بافتی آن (SILPA, 1999)

کلاس بافت خاک	مقدار مادهٔ آلی خاک (٪)			
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
لوم شنی، شنی، شنی لومی	<۰/۸	۰/۸-۱/۴	۱/۵-۲/۰	>۲
سیلتی، لوم سیلتی، لوم رسی شنی، رسی شنی، لومی	<۱	۱-۱/۸	۱/۹-۲/۵	>۲/۵
لوم رسی سیلتی، رسی سیلتی، لوم رسی، رسی	<۱/۲	۱/۲-۲/۲	۲/۳-۳	>۳

داده‌های بافت خاک

برای پیش‌بینی تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک از داده‌های بافت خاک بعنوان متغیر کمکی استفاده شد. از این‌رو برای تهیهٔ نقشهٔ مادهٔ آلی خاک و وضعیت کمی آن نقشهٔ گروه‌های مختلف ذرات خاک و نیز بافت خاک مورد نیاز بود. این نقشه‌ها که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند، از مطالعات قبلی در این منطقه بدست آمده‌اند (Mirzaie, 2015). درجهٔ وضوح این نقشه‌ها ۳۰ متر می‌باشد. به‌طوری‌که نقشهٔ بافت خاک نشان می‌دهد بخش اعظم خاک‌های این منطقه (۶۴ درصد) دارای بافت سنگین لوم رسی می‌باشند. تنها حدود ۱۹ درصد از خاک‌های منطقه دارای بافت متوسط لومی بوده و بقیهٔ خاک‌های منطقه دارای سایر بافت‌ها هستند که به‌طور پراکنده در منطقه توزیع یافته‌اند.

Archive
www.SID.ir



شکل ۲. نقشه‌های ذرات شن، سیلت، رس و بافت خاک در منطقهٔ مورد مطالعه (Mirzaie, 2015)

داده‌های سنجش از دور

علاوه بر بافت خاک، از شاخص‌های پوشش گیاهی نیز برای برآورد تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک استفاده شد. این شاخص‌ها از تصاویر ماهوارهٔ لندست ۸ استخراج شدند. تصاویر ماهوارهٔ لندست ۸ از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی ایالات متحدهٔ آمریکا (https://earthexplorer.usgs.gov) در سطح تصحیحات L1T دریافت شد که در آن تصحیحات هندسی ضمن رفع اثر جابجایی ناشی از پستی و بلندی‌ها (تصحیحات ارتو) انجام شده است. بعلاوه به منظور اطمینان از هندسهٔ تصویر از نقشه‌های جاده‌ها و آبراهه‌ها با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شد و تطابق دقیق این تصاویر مورد تأیید قرار گرفت. تاریخ تصاویر مورد استفاده با تاریخ نمونه‌برداری از خاک‌ها مصادف بود. قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لازم است تصحیحات دیگری نیز بر روی آنها انجام شود. یکی از این موارد تصحیحات رادیومتری می‌باشد. تصحیحات رادیومتری برای کاهش و یا حذف دو نوع خطای عمده، خطای اتمسفری و خطای دستگاهی به کار می‌روند. در بیشتر موارد از جمله در این تحقیق به علت جوان بودن ماهواره لندست ۸ خطای دستگاهی نادیده گرفته می‌شود. برای انجام تصحیح اتمسفری از نرم‌افزار ENVI 5.3 و روش FLAASH استفاده شد.

شاخص‌های پوشش گیاهی بر این اصل استوارند که سطوح مختلف نورهای متفاوتی از خود بازتاب می‌کنند. این شاخص‌ها عبارت بودند از شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده (SAVI). شاخص NDVI شاخصی از سبزینگی گیاهی و فعالیت فتوسنتزی است و یکی از پرکاربردترین شاخص‌های پوشش گیاهی است که به صورت زیر تعریف می‌شود (Anderson *et al*, 1993):

$$NDVI = \frac{(NIR - \mathrm{Re}\, d)}{(NIR + \mathrm{Re}\, d)} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

www.SID.ir

که در آن NIR مقدار باند نزدیک به مادون‌قرمز و Red مقدار باند قرمز در تصاویر ماهواره‌ای است. در مناطقی که پوشش گیاهی کم (کمتر از ۴۰ درصد) و سطح خاک لخت است برای اصلاح اثر درخشندگی سطح خاک از شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده (SAVI) استفاده می‌شود (Huete, 1988):

$$NDVI = \frac{(NIR - \mathrm{Re}\, d)}{(NIR + \mathrm{Re}\, d + L)}(1+L) \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن L عامل تصحیح درخشندگی سطح خاک است و مقدار آن تابع میزان پوشش گیاهی سطح خاک است. Huete (1988) مقدار آن را برای مناطق با پوشش گیاهی بالا برابر ۰/۲۵، برای مناطق با پوشش گیاهی متوسط برابر ۰/۵ و برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم برابر ۱ پیشنهاد کرده است.

روش‌های درون‌یابی

روش اصلی در این مطالعه برای برآورد تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک روش رگرسیون کریجینگ بود؛ اما به منظور مقایسه از روش کریجینگ معمولی نیز استفاده شد. در روش رگرسیون کریجینگ ابتدا با استفاده از رگرسیون چند متغیرهٔ گام به گام رابطهٔ بین ماده آلی با گروه‌های مختلف ذرات خاک (شن، سیلت و رس) و شاخص‌های پوشش گیاهی بدست آمد. با استفاده از مدل بدست آمده نقشهٔ اولیهٔ ماده آلی خاک تهیه شد. سپس مقدار باقیمانده‌ها با استفاده از کریجینگ معمولی درون‌یابی شد. در نهایت نقشهٔ نهایی ماده آلی خاک از جمع نقشهٔ اولیه با نقشهٔ باقیمانده‌ها بدست آمد (Burrough, 1986; McBratney and Webster, 1986). کلیهٔ محاسبات و تهیهٔ نقشه‌ها در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزارهای MATLAB 8.6.0 و Arc GIS 10.2 انجام گرفت.

روش ارزیابی صحت

برای ارزیابی عملکرد هرکدام از روش‌های درون‌یابی از روش ارزیابی متقاطع استفاده شد. بدین منظور از سه شاخص آماری میانگین خطا (ME)، ضریب نیکویی برازش یا ضریب تبیین (R^2) و شاخص نش- ساتکلیف (NS) (Nash and Sutcliffe, 1970) استفاده شد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right] \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

(رابطه ۴)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\left(\hat{Z}(x_i) - \bar{\hat{Z}}(x_i)\right)\left(Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{Z}(x_i) - \bar{\hat{Z}}(x_i)\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)\right)^2}$$

(رابطه ۵)

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left[Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)\right]^2}$$

در این فرمول‌ها، N تعداد کل نمونه‌ها، $Z(x_i)$ مقادیر اندازه‌گیری شده، $\hat{Z}(x_i)$ مقادیر پیش‌بینی‌شده، $\bar{Z}(x_i)$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و $\bar{\hat{Z}}(x_i)$ میانگین مقادیر برآورد شدهٔ مادهٔ آلی خاک در مکان x می‌باشد. لازم به ذکر است که در مواردی که ارزیابی یک مدل بر اساس داده‌هایی که خود مدل با استفاده از آنها بدست آمده است انجام گیرد، از شاخص R^2 استفاده می‌شود. در چنین مواردی شاخص‌های R^2 و NS با هم برابر خواهند شد. اما در مواردی که ارزیابی یک مدل بر اساس یک گروه دادهٔ مستقل انجام شود، از شاخص NS استفاده می‌شود. مقدار شاخص NS از $-\infty$ تا ۱ متغیر است. مقدار ۱ بیانگر برازش کامل مقادیر برآورد شده بر مقادیر اندازه‌گیری شده است. برای مقادیر NS کمتر از صفر کارایی مدل ضعیف، بین صفر تا ۰/۵ متوسط و بزرگتر از ۰/۵ رضایت‌بخش خواهد بود (Quinton, 1997; Moore *et al*, 2007).

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها

در جدول (۲) دامنهٔ تغییرات و توزیع برخی از ویژگی‌های خاک-های مورد مطالعه ارائه شده است. بافت خاک‌ها بیشتر در محدودهٔ سنگین تا متوسط می‌باشد (شکل ۳). مقدار مادهٔ آلی آن‌ها بین ۰/۳۴ تا ۴/۵۱ درصد تغییر می‌کند. مقدار ۰/۳۴ مربوط به کاربری بایر و مقدار ۴/۵۱ درصد مربوط به زمینی با کاربری گندم آبی بوده است. آزمون لیلی فورس در سطح معنی-دار ۵ درصد نشان داد که غیر از درصد رس خاک سایر ویژگی-های اندازه‌گیری شده از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. مقدار پارامتر تبدیل باکس-کاکس برای نرمال کردن داده‌ها (λ) در جدول (۲) ارائه شده است.

در شکل (۴) نقشهٔ شاخص‌های پوشش گیاهی در منطقهٔ مورد مطالعه نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می‌شود در قسمت‌های شمالی منطقه مقدار این شاخص کمتر از قسمت-های جنوبی است که خود بیانگر وجود پوشش گیاهی بیشتر در قسمت‌های جنوبی است. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود اراضی با کشت آبی در این مناطق باشد که عملکرد بیشتر و در نتیجه تولید بیوماس بیشتری را به همراه دارد.

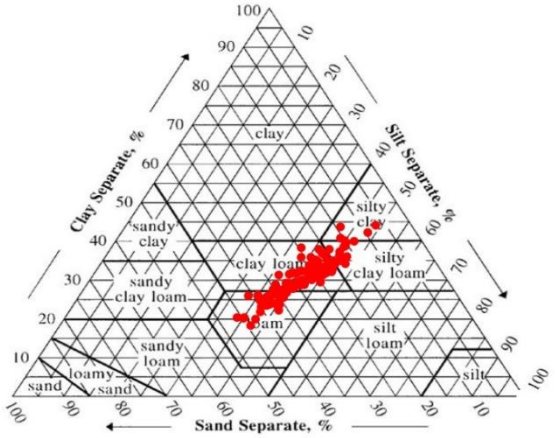
Archive of SID

www.SID.ir

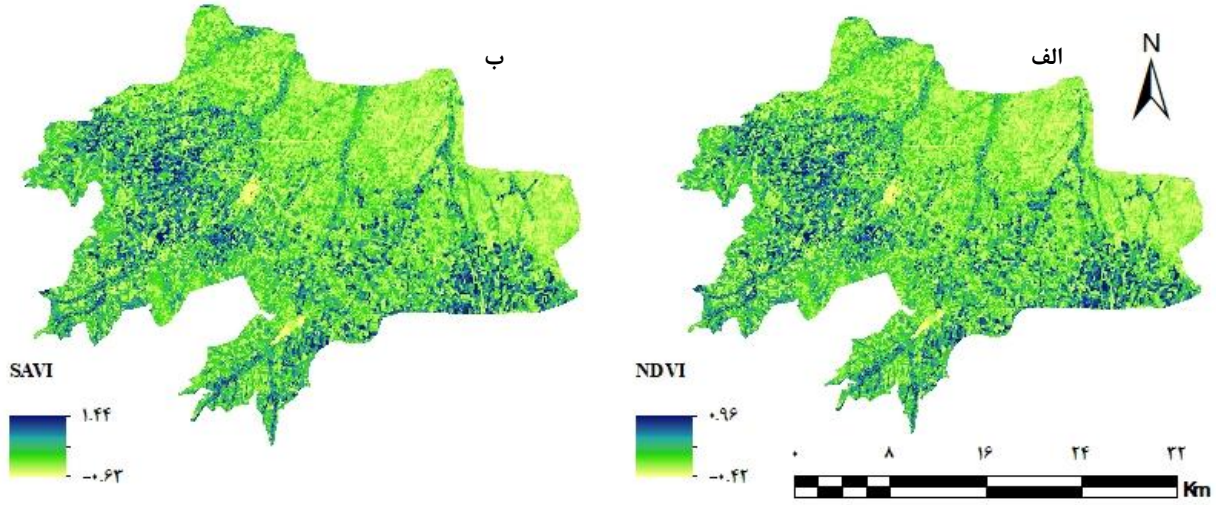
جدول ۲. دامنهٔ تغییرات و توزیع برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

متغیر	تعداد نمونه	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	λ*
شن (٪)	۱۵۰	۶	۶۳/۵	۲۸/۶۴	۱۳/۱۲	۰/۴۵	-۰/۵۵	۰/۴۲۷
سیلت (٪)	۱۵۰	۲۲	۵۸/۵	۴۱/۲۱	۸/۲۶	-۰/۲۹	-۰/۴۸	۱/۴۹۱
رس (٪)	۱۵۰	۹	۵۲/۵	۳۰/۱۵	۸/۶۳	-۰/۰۴	-۰/۳۷	۰/۹۸۴
مادهٔ آلی (٪)	۱۵۰	۰/۳۴	۴/۵۱	۱/۸۲	۰/۶۸	۱/۱۲	۲/۲۸	۰/۲۹۸

* مقدار پارامتر تبدیل باکس-کاکس برای نرمال کردن داده‌ها



شکل ۳. توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه



شکل ۴. نقشه‌های الف) شاخص NDVI و ب) شاخص SAVI با L=0.5 در منطقهٔ مورد مطالعه

رگرسیون خطی چندمتغیره

متغیرهای مستقل کاندیدا شده برای ایجاد مدل رگرسیونی چندمتغیرهٔ خطی عبارت بودند از درصدهای شن، سیلت، رس، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و نیز شاخص پوشش گیاهی اصلاح‌شده (SAVI) با مقادیر L برابر ۰/۵ و ۱. برای دست‌یابی به بهترین مدل از مقدار اصلی و مقدار نرمال شدهٔ هر کدام از متغیرها (برمبنای تبدیل باکس-کاکس) استفاده شد. در روش گام به گام استفاده شده برای انتخاب متغیرهای مستقل بیشترین سطح معنی‌دار (P Value) برای وارد شدن یک متغیر به مدل ۰/۰۵ و کمترین سطح معنی‌دار برای حذف یک متغیر از مدل ۰/۱ بود.

بهترین مدل رگرسیونی بر مبنای مقدار نرمال شدهٔ مادهٔ آلی خاک بدست آمد (جدول ۳). آزمون t برای ضرایب رگرسیون نشان داد که متغیرهای درصد رس و شاخص SAVI (L=0.5) اثر معنی‌داری بر روی مقدار مادهٔ آلی خاک داشتند (P <۰/۰۵)، درحالی‌که متغیرهای درصد شن و سیلت دارای اثر معنی‌داری بر روی مقدار مادهٔ آلی خاک نبودند (P >۰/۰۵). همان‌طور که این نتایج نیز نشان می‌دهند، عموماً رابطهٔ مستقیمی بین مقدار رس خاک و مقدار مواد آلی آن وجود دارد

www.SID.ir

و دلیل این امر نگهداشت بیشتر عناصر غذایی و آب در این‌گونه خاک‌هاست. در نتیجه تولید و تجمع مواد آلی به مقدار بیشتری در خاک‌های ریزبافت صورت می‌گیرد. از طرفی آنزیم‌ها جذب کانی‌های رسی شده و بدین وسیله به صورت غیرفعال در می‌آیند. آن دسته از مواد آلی نیز که جذب رسها می‌گردند در برابر عمل میکروارگانیزم‌ها مقاوم گردیده و به سختی تجزیه می‌شوند (Mahmoodi and Hakimian, 1998).

همچنین بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش SAVI مقدار مادهٔ آلی خاک نیز افزایش می‌یابد. از نظر بیوفیزیکی SAVI بخشی از انرژی تابشی است که می‌تواند صرف فعالیت‌های فتوسنتزی گردد. مقادیر بزرگتر آن با پوشش گیاهی فعال از نظر فتوسنتزی همبستگی دارد (Anderson *et al*, 1993). افزایش پوشش گیاهی نیز به تبع خود افزایش مقدار مادهٔ آلی خاک را به همراه خواهد داشت.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مدل رگرسیون خطی چند متغیرهٔ بدست آمده

متغیر	ضریب رگرسیون	خطای استاندارد	t	P value
ثابت رگرسیون	-۰/۳۶۹	۰/۱۰۶	-۳/۴۷۵	۰/۰۰۱
Clay	۰/۰۳۰	۰/۰۰۳	۹/۰۳۶	<۰/۰۰۱
SAVI (L=0.5)	۰/۲۶۹	۰/۱۱۵	۲/۳۳۸	۰/۰۲۱

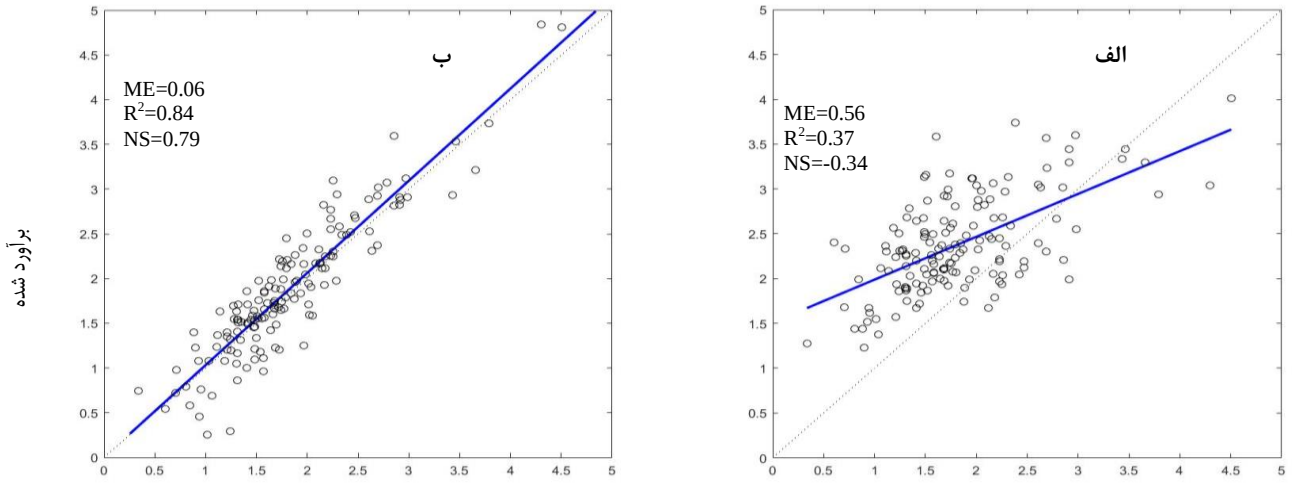
آزمون F (جدول ۴) نشان داد که مدل بدست آمده بسیار معنی‌دار بود (P <۰/۰۰۱). این مدل توانست ۳۸ درصد از تغییرات مادهٔ آلی خاک را توصیف کند. با این حال، نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که برای توصیف دقیق‌تر تغییرات مادهٔ آلی خاک مدل‌های پیچیده‌تری نیاز است.

جدول ۴. نتایج تجزیهٔ واریانس برای مدل رگرسیون خطی بدست آمده

منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	واریانس	F	P value
رگرسیون	۱۰/۸۲	۲	۵/۴۱	۴۵/۰۷	<۰/۰۰۱
خطا	۱۷/۶۴	۱۴۷	۰/۱۲		
کل	۲۸/۴۶	۱۴۹			

درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی

در روش کریجینگ معمولی نیز بهترین نتایج بر مبنای مقدار نرمال شدهٔ مادهٔ آلی خاک بدست آمد. ویژگی‌های واریوگرام در این روش در جدول (۵) نشان داده شده است. مشابه بودن واریوگرام‌های به‌دست‌آمده در جهت‌های مختلف بیانگر همسانگرد بودن این پارامتر در منطقهٔ مورد مطالعه بود. نتایج حاصل از ارزیابی متقاطع (شکل ۵-الف) نشان داد که این روش دارای خطاهای سیستماتیک می‌باشد؛ بدین معنی که در مقادیر کمتر کربن آلی خاک دارای خطای بیش‌برآوردی و در مقادیر بیشتر آن دارای خطای کم‌برآوردی است. مقدار شاخص نش-ساتکلیف برای این روش کم و منفی است. این روش تنها می‌تواند ۳۷ درصد از تغییرات مکانی مادهٔ الی خاک را توجیه کند. همهٔ این نتایج نشان می‌دهند که در این شرایط روش کریجینگ معمولی نیز به تنهایی برای برآورد تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک در منطقهٔ مورد مطالعه کافی نیست و برای توصیف دقیق‌تر این تغییرات بایستی از متغیرهای کمکی نیز بهره گرفت. این مسأله ممکن است ناشی از تراکم پایین نقاط نمونه‌برداری باشد؛ زیرا همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، برای حصول نتایج مطلوب در روش کریجینگ معمولی بایستی تراکم نقاط نمونه‌برداری بالا باشد (Liao *et al*, 2013).



شکل ۵. ارزیابی متقاطع درون‌یابی مادهٔ آلی خاک به روش‌های الف: کریجینگ معمولی و ب: رگرسیون کریجینگ

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۵. پارامترهای واریوگرام‌های برازش داده شده

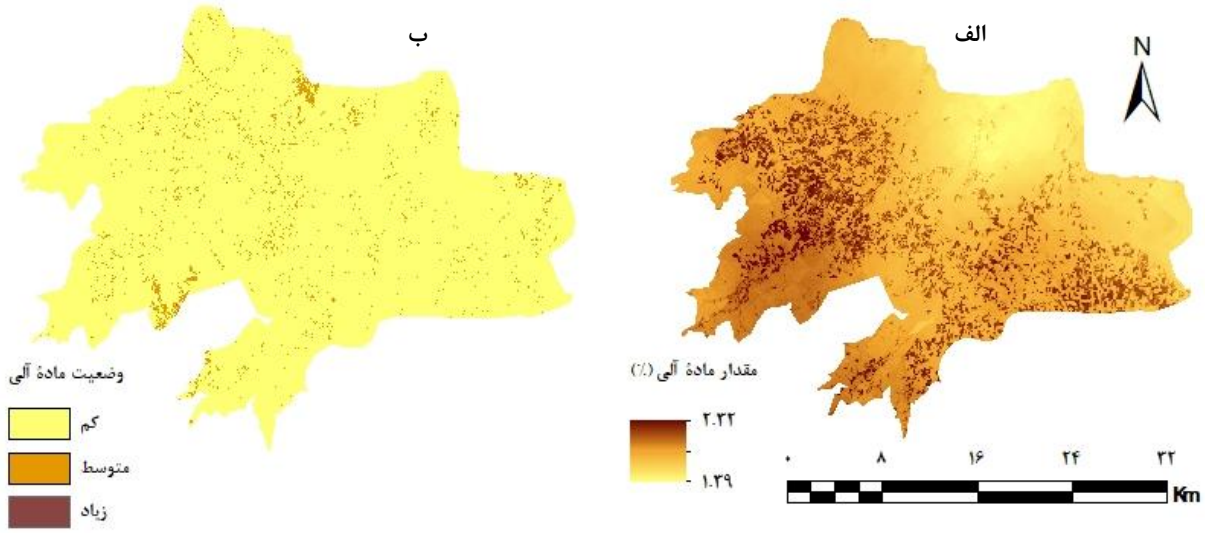
متغیر	طول گام (m)	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	دامنه (m)	ناهمسانگردی
مادهٔ آلی (٪)	۱۲۳۷	کروی	۰/۱۹	۰/۳۹	۶۳۵۷	ندارد
باقیمانده‌ها (٪)	۸۵۱	کروی	۰/۱۰	۰/۲۴	۲۸۴۳	ندارد

درون‌یابی به روش رگرسیون کریجینگ

در این روش پس از آنکه روند کلی داده‌های مادهٔ آلی خاک با استفاده از مدل رگرسیونی بدست آمده حذف شد، مقادیر باقیمانده‌ها به روش کریجینگ معمولی درون‌یابی شدند. ویژگیهای واریوگرام باقیمانده‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. در اینجا نیز مشابه بودن واریوگرام‌های به‌دست‌آمده در جهت‌های مختلف بیانگر همسانگرد بودن این پارامتر در منطقهٔ مورد مطالعه بود. نتایج حاصل از ارزیابی متقاطع (شکل ۵-ب) نشان داد که دقت این روش در مقایسه با روش کریجینگ معمولی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته، بطوریکه این روش می‌تواند ۸۴ درصد از تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک را توصیف کند. مقدار شاخص نش-ساتکلیف برابر ۰/۷۹ است که بیانگر کارایی بالای این روش در پیش‌بینی تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک است. همچنین مقدار شاخص ME در این روش نسبت به روش کریجینگ معمولی به اندازهٔ کافی به صفر نزدیک شده است که بیانگر عدم وجود خطاهای سیستماتیک در این روش است.

نقشه‌های مقدار و وضعیت مادهٔ آلی خاک

در شکل (۶-الف) نقشهٔ مقدار مادهٔ آلی خاک در منطقهٔ مورد مطالعه که با استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ تهیه شده است، نشان داده شده است. این نقشه‌ها دارای درجهٔ وضوح ۳۰ متر می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار مادهٔ آلی خاک بتدریج از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. این افزایش با افزایش شاخص SAVI (شکل ۴- ب) همسویی دارد. این موضوع را می‌توان به افزایش تراکم کشت آبی و تولید بیشتر بیوماس گیاهی و به تبع آن ترسیب بیشتر کربن آلی در خاک نسبت داد. در شکل (۶-ب) نقشهٔ وضعیت مادهٔ آلی خاک در منطقهٔ مورد مطالعه نشان داده شده است. این نقشه از همپوشانی نقشهٔ مقدار مادهٔ آلی خاک و نقشهٔ بافت خاک (شکل ۲) بر اساس معیارهای داده شده در جدول (۱) بدست آمده است. همانطور که این نقشه نشان می‌دهد مقدار مادهٔ آلی در بیش از ۹۶ درصد از خاک‌های منطقه در وضعیت کم قرار دارد. تنها کمتر از ۴ درصد از خاک‌های منطقه از نظر مادهٔ آلی خاک در وضعیت متوسطی قرار دارند که آن هم به صورت پراکنده و موضعی در تمام منطقه توزیع یافته است. این نتایج بیانگر آنند که مقدار مادهٔ آلی خاک‌های منطقهٔ مورد مطالعه وضعیت مناسبی نداشته و حفظ و حراست از مادهٔ آلی خاک و ترسیب آن در خاک باید در اولویت برنامه‌های مدیریت خاک در این منطقه باشد.



شکل ۶. نقشه‌های الف- مقدار و ب- وضعیت مادهٔ آلی خاک در منطقهٔ مورد مطالعه

Archive of SID

www.SID.ir

کمبود مادهٔ آلی خاک ممکن است ناشی از فرسایش خاک تحت شرایط اقلیم مدیترانه‌ای و اراضی تپه‌ای توأم با فعالیت‌های زراعی شدید یا نامناسب در منطقه باشد. با توجه به کم بودن مادهٔ آلی در خاک‌های این منطقه استفاده از روش‌های مناسب زراعی و خاک‌ورزی به منظور افزایش مادهٔ آلی خاک، جلوگیری از فرسایش خاک و همچنین حفظ وضعیت اکولوژیکی و بارخیزی خاک ضروری است. افزایش مادهٔ آلی خاک در مناطق فرسایش یافته (مناطق با مادهٔ آلی کم) می‌تواند با انجام اقدامات حفاظت خاک مانند شخم حفاظتی، خاک‌ورزی بدون شخم، استفاده از گیاهان علوفه‌ای در تناوب زراعی، بازگرداندن بقایای گیاهی به خاک، کودسبز دهی و همچنین افزودن کودهای آلی به خاک مانند کمپوست، کود دامی، لجن فاضلاب و غیره صورت پذیرد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک در دشت قروه در استان کردستان برآورد شد. نتایج بدست آمده نشان داد که درصد رس خاک و شاخص SAVI اثر معنی‌داری بر روند تغییرات مکانی مادهٔ آلی خاک دارند. استفاده از این متغیرها بعنوان متغیر کمکی دقت روش کریجینگ را برای درون‌یابی مادهٔ آلی خاک به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. این روش توانست ۸۴ درصد از تغییرات مادهٔ آلی خاک را توصیف کند. همچنین نقشهٔ بدست آمدهٔ وضعیت مادهٔ آلی خاک‌های منطقه نشان داد که بیش از ۹۷ درصد از خاک‌های منطقه از نظر مادهٔ آلی در وضعیت کم قرار دارند. این مسأله لزوم حفظ و حراست از مادهٔ آلی و ترسیب آن در خاک را در برنامه‌های مدیریت خاک در این منطقه آشکار می‌سازد.

نمادها

N: تعداد کل نمونه‌ها

x: مکان

Z: مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر مکانی

$\hat{Z}$: مقادیر پیش‌بینی‌شده متغیر مکانی

$\bar{Z}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر مکانی

$\bar{\hat{Z}}$: میانگین مقادیر برآورد شدهٔ متغیر مکانی

REFERENCES

Anderson, G. L., Hanson, J. D. and R. H. Haas. (1993). Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of the Environment*, 45(2),165-175.

Ben-Dor, E., Goldshleger, N., Eshel, M., Mirablis, V. and Bason, U. (2008). Combined active and passive remote sensing methods for assessing soil salinity. In Metternicht G and Zinck A (Ed.), *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*, (pp. 235–258). Boca Raton, FL, USA: CRC Press

Burgess, T. M. and Webster, R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: the semivariogram and punctual kriging. *Soil Science*, 31, 315–331.

Burrough, P. A. (1986). Principles of geographical information systems for land resources assessment. New York: Oxford university press.

Chen, F., Kissel, D. E., West, L. T., Adkins, W. (2000). Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 746–753.

Eldeiry, A. and Garcia, L. A. (2009). Comparison of regression kriging and cokriging techniques to estimate soil salinity using Landsat images. *Hydrology Days*, 27:38.

Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. (2nd ed.). (pp. 383-409). Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.

Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 259-309.

Istok, J. D., Smyth, J. D., Flint, A. L. (1993). Multivariate geostatistical analysis of groundwater contaminant: a case history. *Groundwater*, 31, 63–74.

Lal, R. (2007). Farming carbon. *Soil and Tillage Research*, 96, 1–5.

Liao, K.., Xu, S., Wu, J. and Zhu, Q. (2013). Spatial estimation of surface soil texture using remote sensing data. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(4), 488-500.

Mahmoodi, Sh. and Hakimian, M. (1998). *Fundamentals of soil science*. Tehran: Tehran university press. (In Farsi).

Marchetti, A., Piccini, C., Francaviglia, R. and Mabit, L. (2012). Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, 22(2), 230–242.

McBratney, A. B. and Webster, R. (1986). Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37, 617–639.

Mirzaie, M. (2015). Prediction of soil organic matter based on soil characteristics, topography and remote sensing data using artificial neural networks. M. Sc. thesis. University of Kurdistan, Sanandaj.

Archive of SID

www.SID.ir

Moore, A. D., McLaughlin, R. A., Mitasova, H. and Line, D. E. (2007). Calibrating WEPP model parameters for erosion prediction on construction sites. *Transactions of the ASABE*, 50(2):507-516.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*,10(3), 282-290.

Odeh, I. O. A., McBratney, A. B. and Chittleborough, D. J. (1995). Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: Heterotopic cokriging and regression kriging. *Geoderma*, 67(3), 215–226.

Quinton, J. N. (1997). Reducing predictive uncertainty in model simulations: A comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). *Catena*, 30(2), 101-117.

Shouse, P. J., Gerik, T. J., Russell, W. B. and Cassel, D. K. (1990). Spatial distribution of soil particle size and aggregate stability index in a clay soil. *Soil Science*, 149, 351–360.

Societ`a Italiana dei Laboratori Pubblici di Agrochimica (SILPA). (1999). *From Soil Analysis to the Fertilization Advice* (in Italian). ASSAM, Agenzia Servizi Settoren Agroalimentare delle Marche, Regione Marche, Jesi, Italy.

Triantafilis, J., Odeh, I. O. A. and McBratney, A. B. (2001). Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 869–878.

Vauclin, M., Vieira, S. R., Vachaud, G. and Nielsen, D. R. (1983). The use of cokriging with limited field observations. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 175–184.

Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareffmethod for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.

Wu, C., Wu, J., Luo, Y., Zhang, L. and DeGloria, S. D. (2009). Spatial prediction of soil organic matter content using cokriging with remotely sensed data. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 1202–1208.

Yadav, V. and Malanson, G. (2007). Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modeling, monitoring and sequestration. *Progress in Physical Geography*, 31:131–154

Yates, S. R. and Warrick, A. W. (1987). Estimating soil water content using cokriging. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 23–30.

Archive of SID

www.SID.ir