مستخرج از پایان نامه

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و پنجم، شماره یک، فروردین ماه ۱۴۰۲(۱۰۶-۹۵)

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های طیفی در برآورد مقدار کربن آلی خاک در جنگل‌های زاگرس میانی در خوزستان

سعیده اسمی زاده [۱]

احمد لندی [۲*]

landi@scu.ac.ir

حمید رضا متین فر [۳]

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۵ **تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۲۵**

چکیده

زمینه و هدف: کربن آلی خاک (SOC) یکی از حیاتی‌ترین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک است که از تنزل و انهدام خاک جلوگیری به عمل می‌آورد. هدف از این مطالعه بررسی تغییرات مقدار SOC با استفاده از تکنیک سنجش از دور در مقایسه با روش‌های نمونه‌برداری مزرعه‌ای در جنگل‌های زاگرس میانی در استان خوزستان ایران در طول ۲ دهه گذشته است.

روش بررسی: نمونه‌های خاک به منظور اندازه‌گیری مقدار SOC در آزمایشگاه به صورت تصادفی و از خاک سطحی (عمق ۱۰-۰ cm) جمع‌آوری شد. آنالیز داده‌های دیجیتالی با استفاده از تصاویر به دست آمده از سنجنده‌های OLI ماهواره لندست ۸ و ETM^+ ماهواره لندست ۷ در سال ۲۰۱۶ (سال نمونه برداری) به منظور تخمین سطوح ماده آلی سطحی خاک انجام یافت. هدف اصلی برقراری ارتباط میان کربن آلی خاک با نسبت‌های انعکاسی باندهای ماهواره لندست و شاخص‌های گیاهی و رطوبتی مانند NDVI، SAVI، BSCI، NDMI و NSMI بر اساس مقادیر SOC به دست آمده از نمونه‌های خاک مناطق جنگلی در کوه‌های زاگرس میانی بوده و بدین منظور این داده‌ها با روش‌های مختلف رگرسیون خطی مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: در بهترین مدل متناسب از روش رگرسیون گام به گام مقدار R^2 برای ماهواره لندست ۸ برابر با ۰/۴۳۵ و برای ماهواره لندست ۷ برابر با ۰/۵۰۱ به دست آمد و بر اساس این نتایج، بررسی تغییرات کربن آلی در سال‌های قبل صورت گرفت.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج نشان دهنده ارتباط معنی‌دار میان مواد آلی خاک و انعکاس‌های محدوده طیفی قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ماهواره لندست، روش رگرسیون گام به گام، شاخص‌های گیاهی و رطوبتی، کربن آلی خاک.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ایران.

J. Env. Sci. Tech., Vol 24, No. 1, April, 2022

Using satellite imagery and spectral data to estimate the amount of soil organic carbon in central Zagros forests in Khoozestan

Saeedeh Esmeizadeh [1]
Ahmad Landi [2*]
landi@scu.ac.ir
Hamidreza Mateenfar [3]

Admission Date:July 16, 2018 Date Received: April 25, 2018

Abstract

Background & Objective: Soil organic carbon (SOC) is one of the most important components of soil physical and chemical properties that prevented soil decay and destruction. The objective of the present study is the evaluation of SOC changes using the remote sensing technique compared with field methods at central Zagros forests in Khoozestan province in Iran over the past 2 decades.

Material and Methodology: The soil samples were collected randomly from the soil surface (0-10 cm depth) to estimate the SOC concentrations in the laboratory. Analysis of digital data by using Operational Land Imager (OLI) of satellite Landsat 8 and Enhanced Thematic Mapper (ETM+) sensor of satellite Landsat 7 images in 2016 (the sampling year) was done to estimate surface organic carbon levels of soil. The main objective was to establish soil organic carbon relation with landsat different bands ratios and also herbal and moisture indexes such as NDVI, SAVI, BSCI, NDMI and NSMI corresponding to the SOC values obtained from soil samples of the forest areas in the central Zagros mountain, and for that purpose these data were evaluated using different linear regression methods.

Findings: The best fit model of stepwise regression method showed R^2 value of 0.435 for landsat 8 and R^2 value of 0.501 for landsat 7 and finally based on these results, evaluation of SOC changes occurred in previous years.

Discussion and conclusion: Results show the significant relationship between soil organic carbon and the reflectance in the Visible, Near-Infrared and Short-wave Infrared part of the spectrum.

Keywords: Landsat satellite; Stepwise regression method; Herbal and moisture indexes; Soil organic carbon.

1- PhD Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. *(*Corresponding Authors*)
3- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.

مقدمه

مواد آلی خاک عامل تشکیل ساختمان خاک و پایدار شدن آن، تنظیم و آزاد سازی مواد غذایی، تسریع فعالیت‌های بیولوژیکی و افزایش ظرفیت تبادل یونی خاک می‌باشند (۱). علاوه بر اهمیت مواد آلی خاک از دیدگاه کشاورزی، بین مقدار ماده آلی خاک و دی‌اکسیدکربن هوا، گرمایش جهانی زمین و بیابان‌زایی ارتباط عمیق و تنگاتنگی وجود دارد (۲). از این رو تعیین میزان مواد آلی سطحی خاک و تهیه نقشه آن نه تنها در کمک به توسعه و اصلاح بخش کشاورزی مؤثر می‌باشد، بلکه برای بررسی وضعیت زیست محیطی کره زمین بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

اندازه‌گیری میزان ماده آلی سطحی خاک و تهیه نقشه آن به روش عملیات زمینی عموما پر هزینه و وقت‌گیر است بوده که بررسی قابلیت داده‌های طیفی ماهواره‌ای در این زمینه و در صورت اثبات کارایی این داده‌ها می‌تواند مشکلات فوق را تا حدودی مرتفع سازد. تصاویر ماهواره‌ای دارای قابلیت‌های متمایزی می‌باشد، به نحوی که هرچه قابلیت‌های بیشتری ازجمله تعداد باندهای بیشتر در اختیار کاربران قرار گیرد، بیشتر بر کارایی و نقش آنها در مطالعات می‌افزاید و می‌تواند به عنوان یک منبع جایگزین در تهیه اطلاعات در زمینه‌های مختلف مطرح شود (۳).

پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که انعکاس حاصل از باندهای طیفی با ویژگی‌های خاک همبستگی داشته و قادر به تخمین خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی با کاهش هزینه و افزایش سرعت نسبت به روش‌های تجزیه آزمایشگاهی است (۴). ماده آلی خاک به عنوان یکی از خصوصیات مهم خاک تحت تأثیر عواملی همچون پوشش گیاهی، خصوصیات خاک و اقلیم منطقه بوده و در صورتی که میزان آن در خاک از ۲ ٪ بیشتر باشد، می‌تواند به عنوان یک عامل غالب در تعیین رفتار طیفی خاک مؤثر باشد (۵). این مواد از بقایای گیاهی و جانوری در مراحل مختلف تجزیه تشکیل شده که تأثیر بسیار قوی بر بازتاب نور از خاک داشته و نور خورشید را در محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه جذب می‌کند (۶). سایر محققین نیز تاثیر ماده آلی را بر انعکاس طیفی در خاک‌های مختلف حاره‌ای مورد مطالعه قرار داده و در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بین ماده آلی سطحی خاک و انعکاس طیفی آن رابطه معکوسی وجود دارد (۷).

داده‌های سنجش از دور چند طیفی منبع داده‌های مهمی برای تشخیص تغییرات و تهیه نقشه پوشش سطح زمین می‌باشد و تشخیص تغییرات یکی از کاربردهای اصلی سنجش از دور است (۸). ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با بازتاب طیفی آن‌ها عموماً به صورت مدل‌های خطی و استفاده از معادلات رگرسیونی بیان می‌شود (۹). سایر مطالعات نیز نشان داده است که موفقیت نقشه‌برداری خصوصیات خاک با تصویر برداری ابرطیفی بستگی به مدلی دارد که پارامترهای خاک را به باندهای ماهواره مرتبط می‌کند و از میان مدل‌های پیشنهادی آن‌ها اغلب آنالیزهای رگرسیون خطی چند متغیره (Multipe Linear Regression)، رگرسیون جزء اصلی (Principal Component Analysis) یا رگرسیون حداقل مربعات جزئی (Partial Least Square) مورد استفاده قرار گرفته است (۱۰). از دهه ۱۹۶۰ محققان مختلف بین بازتاب طیفی خاک و میزان ماده آلی آن همبستگی برقرار کرده و روابطی را برای تبدیل بازتاب به میزان ماده آلی به وجود آورده‌اند (۱۱-۱۳). این محققان برای مدل‌سازی و تخمین میزان ماده آلی از روی بازتاب خاک معمولاً از رگرسیون چندگانه گام به گام (Stepwise Regression) استفاده کرده‌اند (۱۱ و ۱۴).

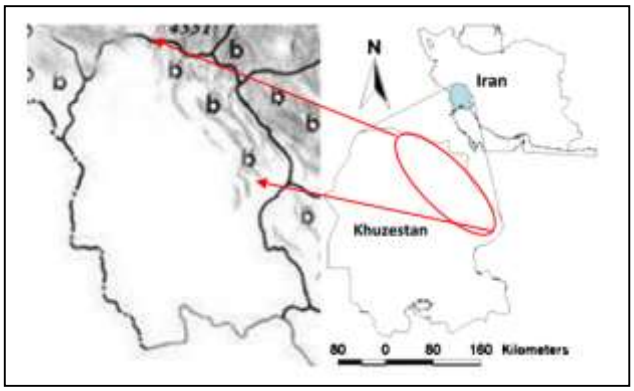
به دلیل اهمیت بالای اکوسیستم جنگلی - مرتعی رشته کوه زاگرس به عنوان یکی از اکوسیستم‌های حیاتی و تضمین کننده سلامت کره زمین، و از آن جایی که این مناطق به دلیل داشتن درختان ارزشمند بلوط و مراتع سرسبز همواره متحمل تخریب-های سودجویانه انسانی بوده و امکان نمونه‌بردارهای زمینی به علت مشکلات تردد و وسعت بالای جنگل‌ها، زمان زیاد و هزینه بالایی را تحمیل می‌کند، و نیز به منظور بررسی امکان سنجی استفاده از روش‌های سنجش از دور در این مناطق، هدف از انجام این پژوهش پی بردن به وجود ارتباط میان داده‌های حاصل از

تصاویر ماهواره لندست با مقدار ماده آلی سطحی خاک در بخشی از جنگل‌های مناطق نیمه‌خشک رشته کوه زاگرس می‌باشد.

روش بررسی

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی با مساحت تقریبی ۵۰۰۰ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه شامل بخش‌هایی ازجنگل-های زاگرس میانی واقع در استان خوزستان بوده و پوشش گیاهی غالب آن درختان بلوط می‌باشد. البته گونه‌های گیاهی دیگری مانند بنه و بادام نیز در این منطقه وجود داشته و پوشش مرتعی نیز قسمت‌هایی را به خود اختصاص داده است. این منطقه در ارتفاع کمتر از ۶۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته و بارندگی سالیانه آن در حدود ۴۰۰ میلی متر می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Geographical location of the study area

روش پژوهش

در این مطالعه نمونه‌برداری از خاک به صورت تصادفی و به منظور اندازه‌گیری مقادیر کربن آلی خاک در آزمایشگاه انجام یافت و سپس بر اساس داده‌های دیجیتالی به دست آمده از تصاویر سنجنده‌های OLI ماهواره لندست ۸ و ETM^+ ماهواره لندست ۷ از نقاط نمونه‌برداری شده (با استفاده از نرم‌افزار GIS)، تخمین مقدار ماده آلی سطحی خاک در این نقاط صورت گرفت. بدین منظور، ارتباط میان مقادیر کربن آلی نمونه‌برداری شده (در سال ۲۰۱۶) با نسبت‌های انعکاسی باندهای ماهواره لندست و نیز شاخص‌های گیاهی و رطوبتی NDVI، SAVI، BSCI، NDMI و NSMI (داده‌های دیجیتالی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال ۲۰۱۶) با استفاده از روش‌های مختلف رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت تا بهترین مدل و رابطه در برآورد کربن آلی در سال ۲۰۱۶ به دست آید. پس از آن کارایی روابط به دست آمده در تخمین کربن آلی خاک در سال نمونه‌برداری و نیز سال‌های قبل از آن بر اساس تناسب مقادیر برآورد شده کربن با استفاده از این روابط در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده آن در سال ۲۰۱۶ تعیین گردید.

نمونه‌برداری

پس از تنظیم زمان نمونه‌برداری زمینی با زمان تصویربرداری سنجنده، ۵۰ نمونه خاک از قسمت سطحی آن (عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر) و به صورت تصادفی از منطقه مورد نظر برداشت شد. این نمونه‌برداری از ۱۰ جنگل همگن در منطقه خوزستان از نظر پوشش گیاهی و شرایط آب و هوایی صورت گرفت. همچنین نمونه‌برداری‌ها در اواسط مهر ماه یعنی در زمانی که حداقل پوشش گیاهی در منطقه وجود دارد انجام یافت. در هر یک از سایت‌های نمونه‌برداری خصوصیات مختلفی مانند گونه‌های گیاهی و تراکم آن‌ها، خصوصیات فیزیکی از قبیل بافت، وزن مخصوص ظاهری و رنگ خاک، خصوصیات شیمیایی مثل pH، ماده آلی به روش اکسیداسیون مرطوب یا والکلی-بلک (۱۵)،

پایداری خاکدانه‌ها به روش غربال کردن مرطوب و سایر موارد در صورت نیاز جهت تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به ماده آلی خاک در نمونه‌های برداشت شده خاک تعیین گردید.

پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره‌های لندست مورد نیاز شامل تصاویر سنجنده‌های OLI ماهواره لندست ۸ و ETM^+ ماهواره لندست ۷ مربوط به منطقه مطالعاتی در تاریخ دهم تا پانزدهم اکتبر (همزمان با نمونه‌برداری در نهم تا چهاردهم مهر) در سال نمونه‌برداری (سال ۲۰۱۶) و نیز در طول مدت زمان سه سال قبل از آن (از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵) برای لندست ۸ و همچنین ۱۶ سال قبل از آن (از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵) برای لندست ۷ ازسایت‌های مرتبط مانند ناسا و سازمان نقشه‌برداری‌های زمین‌شناسی آمریکا[1]تهیه گردید. به دلیل وجود خطوط هاشوری یا جا مانده بر تصاویر ماهواره لندست ۷ و با توجه به این که نیاز به انجام تصحیحات اتمسفری بر روی تمام تصاویر وجود دارد با استفاده از نرم‌افزار ENVI به کمک روش‌های gap-filling که برای تصحیح خطوط هاشوری است و Dark Subtraction که برای تصحیحات اتمسفری است، تصحیحات مورد نیاز انجام یافت. سپس بر روی این تصاویر و با استفاده از نرم‌افزار GIS ، محدوده مطالعاتی را مشخص کرده، برش زده، پلیگون محدوده مورد نظر را برای حذف عواملی مثل جاده و مسیرهای عبور آب رسم کرده و عملیات دیجیت کردن بر روی آن انجام گرفته است. پس از آن با تهیه فایل نقطه‌ای نواحی مطالعاتی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی، ارزش‌های طیفی متناظر با این نقاط برای فرآیند مدل‌سازی استخراج گردید.

مدل‌سازی مواد آلی خاک

به منظور مدل‌سازی ارتباط میان کربن آلی خاک با باندهای سنجنده و شاخص‌ها، روش‌های مختلف رگرسیون خطی چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت از بهترین مدل متناسب به دست آمده یعنی مدل رگرسیونی چند متغیره گام به گام یا SWR استفاده شد. از آن جایی که در انتخاب متغیرها برای مدل رگرسیونی ممکن است برخی از متغیرهای مستقل کارایی لازم را در تبیین متغیر وابسته نداشته باشند، با استفاده از روش گام به گام با حذف متغیرهای مستقلی که نقش تعیین-کننده‌ای در مدل ندارند، بهترین رابطه تعیین می‌گردد. پس از آن می‌توان نقشه درون‌یابی (نقشه پارامتر مورد نظر) را برای هر سال منطقه به صورت مجزا تهیه و اقدام به تهیه نقشه تغییرات و به دست آوردن شیب تغییرات نمود.

محاسبه شاخص‌ها

پس از انجام آنالیز آزمایشگاهی کربن آلی خاک، نیاز به برقراری ارتباط میان باندهای سنجنده و سایر متغیرهای مستقل یعنی شاخص‌های گیاهی و رطوبتی مورد بررسی با ماده آلی خاک است که این شاخص‌ها در نرم‌افزار ENVI 5.1 به صورت روابط ۱ تا ۵ محاسبه می‌شوند.

$$NDVI\ (Normalized\ Difference\ Vegetation\ Index) = (R_{NIR} - R_R)/(R_{NIR} + R_R) \quad (۱)$$

$$SAVI\ (Soil\ Adjusted\ Vegetation\ Index) = (R_{NIR} - R_R) \times (1+L)/(R_{NIR} + R_R + L) \quad L = 0.5 \quad (۲)$$

$$BSCI\ (Biological\ Soil\ Crusts\ Index) = (1-L) \times |R_R - R_{Green}|/[(R_{Green} + R_R + R_{NIR})/3] \quad L = 2\text{-}4 \quad (۳)$$

$$NSMI\ (Normalized\ Soil\ Moisture\ Index) = (R_{1800} - R_{2119})/(R_{1800} + R_{2119}) \quad (۴)$$

$$NDMI\ (Normalized\ Difference\ Moisture\ Index) = (R_{NIR} - R_{MIR})/(R_{NIR} + R_{MIR}) \quad (۵)$$

در روابط بالا R_{Green} باند سبز، R_R باند قرمز، R_{NIR} باند مادون قرمز نزدیک و R_{MIR} باند مادون قرمز میانی است.

نتایج

توزیع داده‌ها (کربن آلی خاک و شاخص‌های محاسبه شده) به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KS) در نرم‌افزار SPSS

1- USGS

بررسی شده و نتایج این آزمون نشان‌دهنده نرمال بودن داده-هاست. به منظور بررسی ارتباط بین مقادیر کربن آلی خاک (متغیر وابسته) و شاخص‌های مورد بررسی (متغیرهای مستقل) نیز آزمون همبستگی پیرسون انجام گرفت که نشان‌دهنده همبستگی معنی‌دار میان کربن آلی خاک با شاخص‌های مورد نظر است.

نتایج مدل رگرسیونی بر اساس داده‌های لندست ۸

جدول ۱ نتایج به دست آمده از بهترین مدل متناسب حاصل از بررسی روش‌های مختلف رگرسیون خطی چند متغیره را نشان می‌دهد و همان طور که مشاهده می‌شود مقدار R یعنی همبستگی بین متغیر وابسته (کربن آلی خاک) با متغیرهای مستقل (داده‌های انعکاسی حاصل از باندهای مختلف ماهواره و شاخص‌های NDVI، SAVI، BSCI، NDMI و NSMI) در این مدل (که مربوط به روش رگرسیون خطی گام به گام یا SWRاست) برابر با ۰/۶۶۰ بوده و مقدار R^2 برای این مدل معادل ۰/۴۳۵ به دست آمده که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد. برای بررسی آماری صحت پیش‌بینی مدل از شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد که برابر با ۰/۳۳ به دست آمده است.

جدول ۱- نتایج مدل منتخب حاصل از روش رگرسیون گام به گام بر اساس داده‌های لندست ۸

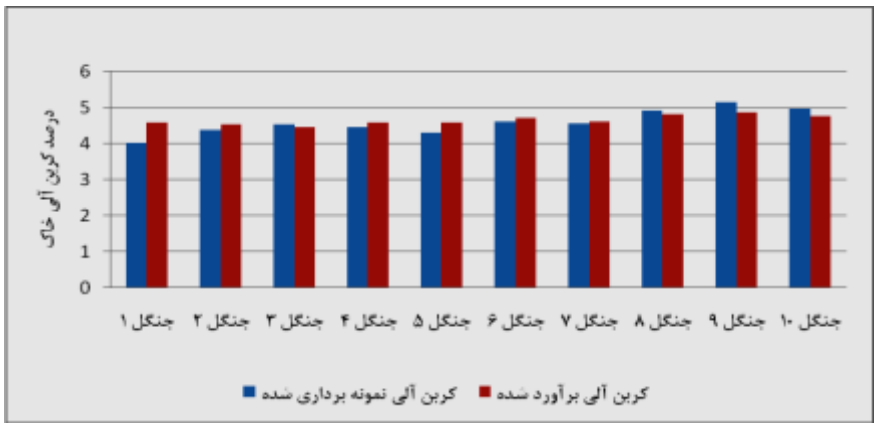
Table 1. Results of the selected model derived from the SWR method based on landsat 8 data

روش رگرسیون	R	R Square	Sig	متغیرهای مستقل
SWR	۰/۶۶۰	۰/۴۳۵	۰/۰۰۰	BSCI, NDMI

بر اساس نتایج به دست آمده از روش SWR در جدول ۱، فرمول نهایی برآورد کربن آلی خاک با ماهواره لندست ۸ به صورت زیر خواهد بود (رابطه ۶).

$$SOC = 4.506 + (BSCI \times -1.777) + (NDMI \times 5.153) \qquad (۶)$$

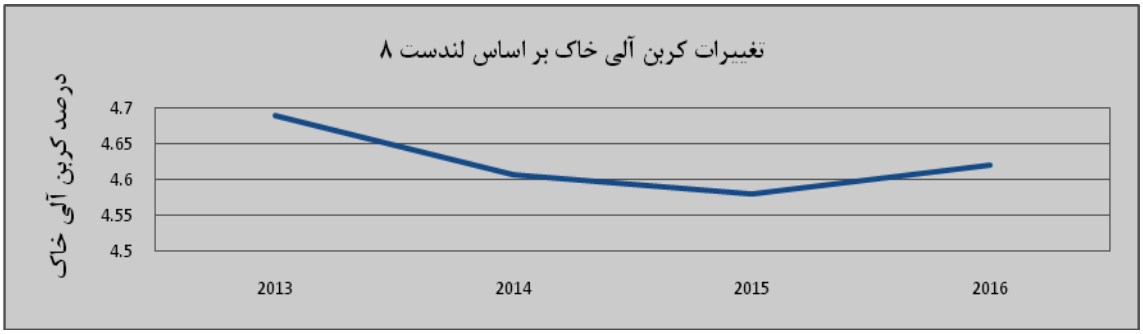
در این رابطه SOC مقدار کربن آلی خاک بر حسب درصد و BSCI و NDMI به ترتیب شاخص پوسته‌های بیولوژیکی خاک و نیز شاخص اختلاف رطوبتی نرمال شده خاک می‌باشند. شکل ۲ مقادیر برآورد شده کربن آلی خاک با استفاده از رابطه ۶ را با مقادیر کربن آلی نمونه‌برداری شده در جنگل‌های منطقه در سال ۲۰۱۶ مقایسه می‌کند.



شکل ۲- مقایسه مقادیر کربن آلی برآورد شده با لندست ۸ در سال ۲۰۱۶ با مقادیر نمونه‌برداری شده، (٪)

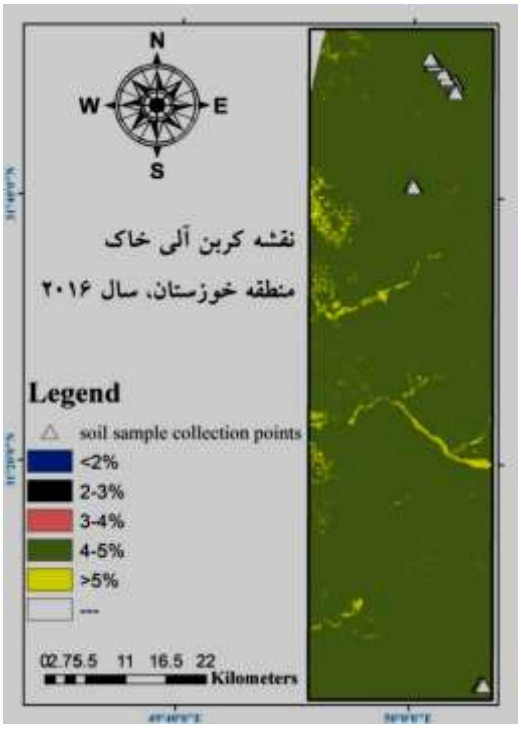
Figure 2. Comparison of estimated organic carbon by landsat 8 in 2016 with sampled values, (%)

در شکل ۳ می‌توان دید که تغییرات کربن آلی خاک در طول سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ در بازه ۴/۵ تا ۴/۷ قرار گرفته که خود نشان‌دهنده پایداری اکوسیستم منطقه می‌باشد. نقشه کربن آلی خاک منطقه مطالعاتی نیز علاوه بر همگن بودن منطقه از نظر ماده آلی خاک، ثبات این کمیت خاکی را با نشان دادن تغییرات جزئی آن با زمان در این سال‌ها ثابت کرده است (شکل‌های ۴ و ۵).



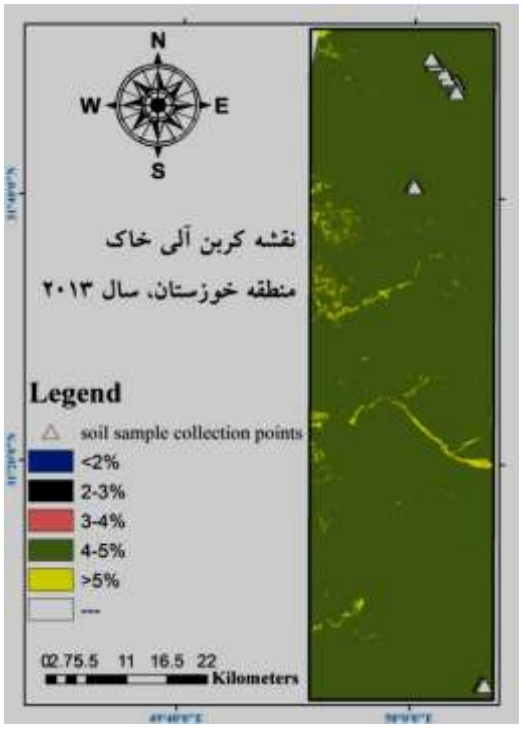
شکل ۳- روند تغییرات کربن آلی خاک در منطقه مطالعاتی

Figure 3. The process of soil organic carbon changes in the study area



شکل ۴- توزیع کربن آلی خاک در سال ۲۰۱۳

Figure 4. Distribution of SOC in 2013



شکل ۵- توزیع کربن آلی خاک در سال ۲۰۱۶

Figure 5. Distribution of SOC in 2016

نتایج مدل رگرسیونی بر اساس داده‌های لندست ۷

نتایج حاصل از آنالیز کربن آلی با استفاده از ماهواره لندست ۷ در مقایسه با نتایج قبلی متفاوت است (جدول ۲). با توجه به این نتایج بهترین مدل از روش SWR دارای R معادل ۰/۷۰۷ و نیز R^2 برابر با ۰/۵۰۱ می‌باشد که در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار است.

جدول ۲- نتایج مدل منتخب حاصل از روش رگرسیون گام به گام بر اساس داده‌های لندست ۷

Table 2. Results of the selected model derived from the SWR method based on landsat 7 data

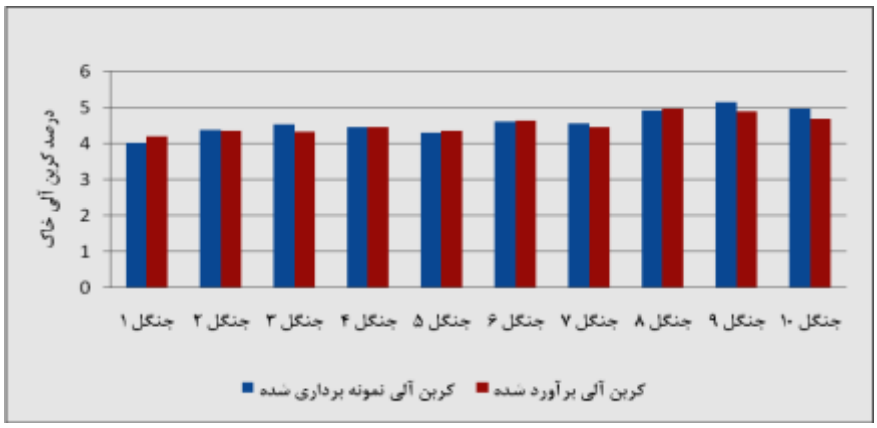
روش رگرسیون	R	R Square	Sig	متغیرهای مستقل
SWR	۰/۷۰۷	۰/۵۰۱	۰/۰۰۰	NSMI, NDVI, B6, BSCI

بر اساس نتایج به دست آمده از روش SWR در جدول ۲، فرمول نهایی برآورد کربن آلی خاک با ماهواره لندست ۷ به صورت زیر خواهد بود (رابطه ۷).

$$SOC = 9.491 + (NSMI \times 3.539) + (NDVI \times 3.075) + (B6 \times -0.043) + (BSCI \times -0.88) \quad (۷)$$

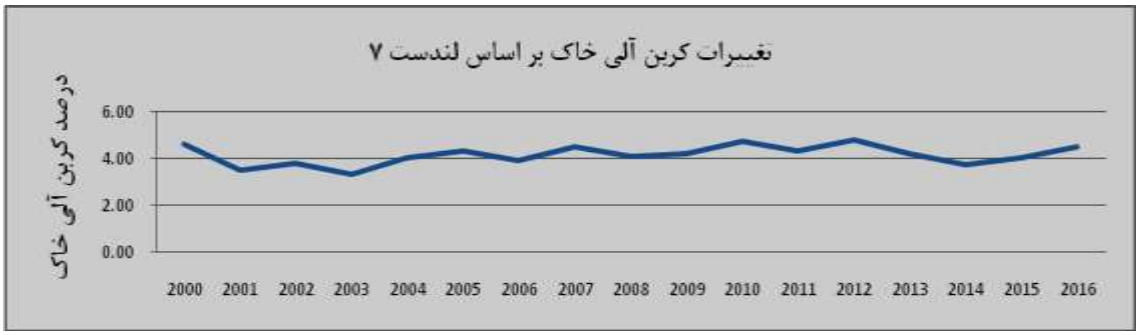
در این رابطه SOC مقدار کربن آلی خاک بر حسب درصد و NSMI، NDVI، B6 و BSCI به ترتیب شاخص رطوبت خاک نرمال شده، شاخص گیاهی، باند مادون قرمز حرارتی و شاخص پوسته‌های بیولوژیکی خاک می‌باشند.

شکل ۶ نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده کربن آلی با ماهواره لندست ۷ به مقادیر واقعی نزدیک بوده و این ماهواره نیز عملکرد مناسبی را در برآورد کربن آلی از خود نشان داده است.



شکل ۶- مقایسه مقادیر کربن آلی برآورد شده با لندست ۷ در سال ۲۰۱۶ با مقادیر نمونه‌برداری شده بر حسب درصد

Figure 6. Comparison of estimated organic carbon by landsat 7 in 2016 with sampled values, (%)

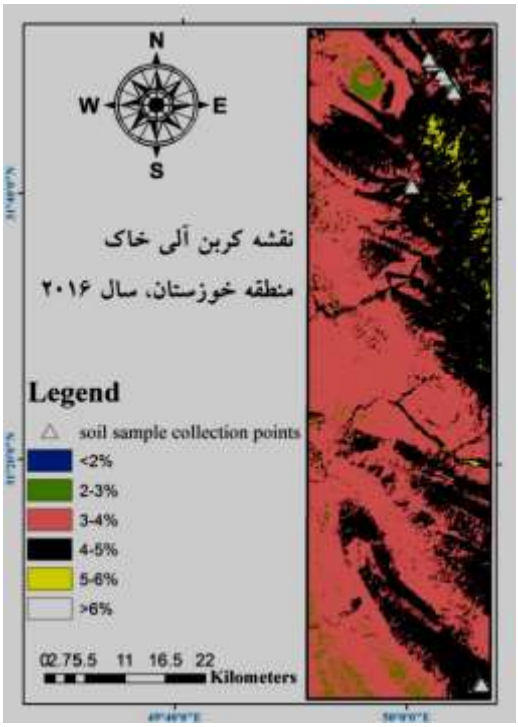


شکل ۷- روند تغییرات کربن آلی خاک در منطقه مطالعاتی

Figure 7. The process of soil organic carbon changes in the study area

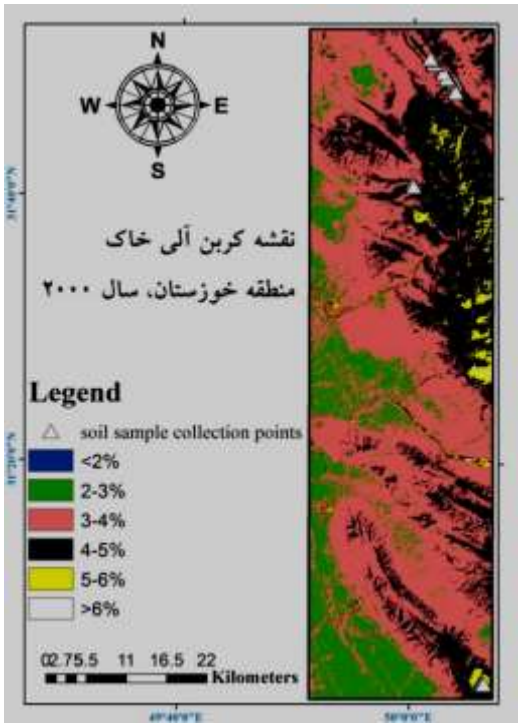
در شکل ۷ می‌توان روند تغییرات کربن آلی در طول حدود ۲ دهه گذشته را که بر اساس داده‌های مربوط به لندست ۷ به دست آمده است، مشاهده نمود. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود تغییرات کربن آلی خاک به صورت نوسانات کوچک افزایشی و کاهشی بوده و روند افزایشی یا کاهشی ماندگاری را از خود نشان نمی‌دهد، به طوری که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ نوسانات کربن آلی درمحدوده ۴ تا ۵ ٪ بوده و تغییرات خاصی را نشان نداده است.

مقایسه نقشه‌های کربن آلی مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۶ نیز روند تغییرات نوسانی و نیز افزایش تدریجی مقدار کربن آلی در کل منطقه با زمان را نشان می‌دهد (شکل‌های ۸ و ۹) و همان طور که مشاهده می‌شود بر خلاف نقشه‌های مربوط به لندست ۸ (شکل‌های ۴ و ۵)، ماهواره لندست ۷ برآوردهای متفاوتی از کربن آلی در منطقه نشان داده است.



شکل ۸- توزیع کربن آلی خاک در سال ۲۰۰۰

Figure 8. Distribution of SOC in 2000



شکل ۹- توزیع کربن آلی خاک در سال ۲۰۱۶

Figure 9. Distribution of SOC in 2016

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان گفت که روابط به دست آمده از تصاویر دو ماهواره لندست ۷ و ۸ نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ میان کربن آلی خاک با طیف مرئی و مادون قرمز است. هر چند که این نتایج بر اساس مدل رگرسیون خطی چند متغیره گام به گام دارای R^2 متوسطی است، اما مقادیر برآورد شده توسط هر دو ماهواره لندست منطقی و متناسب است. حضور شاخص‌های رطوبتی در هر دو رابطه به دست آمده نشان‌دهنده نقش تأیین‌کننده رطوبت خاک در برآورد کربن آلی آن می‌باشد. رطوبت خاک باعث کاهش بازتاب در بخش مرئی و مادون قرمز و درنتیجه افزایش برآورد کربن آلی خاک می‌شود (۱۶). باید در نظر داشت که رطوبت خاک نه تنها با افزایش میزان جذب به وسیله مولکول‌های آب، بلکه با تیره‌تر کردن رنگ خاک نیز باعث کاهش انعکاس از خاک مرطوب می‌شود و به طور معمول خاک مرطوب از خاک خشک (در محدوده طیف مرئی) تیره‌تر است، زیرا بازتاب طیفی آن کاهش می‌یابد که علت این تیرگی را فیلم آب اطراف ذرات خاک و اثرهای آن می‌دانند (۱۷). علاوه بر آن شاخص BSCI در این روابط در برآورد کربن آلی خاک دارای علامت منفی بوده و به عبارتی با افزایش مقدار آن کربن آلی

خاک کمتر خواهد بود. تجمع بقایا در مناطق جنگلی به این دلیل که انعکاس‌های مستقیم از خاک را کاهش می‌دهد با برآورد کربن آلی رابطه معکوس دارد. از طرف دیگر تجمع این مواد بر سطح خاک احتمالاً به دلیل کند بودن روند تجزیه بقایای آلی می‌باشد که کاهش ورودی کربن آلی به خاک را به دنبال خواهد داشت. انعکاس طیفی خاک تابع شرایط مختلف خاک می‌باشد، به نحوی که مقدار کربن آلی سطحی موجود در آن منجر به کاهش انعکاس طیفی خاک می‌شود (۱۲). به عبارت دیگر کربن آلی خاک به دلیل وجود پیچیدگی در شیمی مواد آلی، رفتار طیفی متنوعی داشته و به دلیل وجود گروه‌های C-H و O-H مشخصه‌های جذب قوی از خود نشان می‌دهد، ولی این مواد در مراحل ابتدایی تجزیه دارای مشخصات جذبی ضعیف‌تری می‌باشند و با پیشرفت تجزیه مواد آلی و افزایش کربن آلی خاک شکل منحنی خاک تحت تأثیر قرار گرفته و مقدار بازتاب، به ویژه در ناحیه مرئی و مادون قرمز نزدیک به دلیل وجود اسید هومیک تیره کاهش می‌یابد (۱۸).

بررسی روند تغییرات کربن آلی خاک نشان‌دهنده وجود نوسانات افزایشی و کاهشی تکرار شونده در مقدار کربن آلی خاک در سال‌های مختلف است که ثابت ماندن تقریبی ذخیره کربن خاک در این سال‌ها را به دنبال داشته و به عبارتی نشان‌دهنده پایداری اکوسیستم می‌باشد. می‌توان گفت که دور از دسترس بودن این مناطق و عدم رفت و آمد انسانی، قرق ماندن منطقه از بیش از دو دهه پیش و محافظت سختگیرانه از آن در برابر چرای دام‌ها و تخریب‌های انسانی و متعاقباً دست‌نخورده ماندن پوشش گیاهی مرتعی و عدم تخریب درختان که باعث افزایش تدریجی پوشش گیاهی در منطقه شده است، از دلایل این پایداری می‌باشد. شکل‌آبادی و همکاران (۲۰۰۷) با انجام مطالعه‌ای در ناحیه زاگرس مرکزی عنوان کردند که قرق در اقلیم‌های مساعد افزایش معنی‌داری را در میزان کربن آلی خاک ایجاد می‌کند. باقری‌فام و همکاران (۱۳۹۲) بیان می‌کنند که از میان مناطق مورد مطالعه آن‌ها مراتع قرق از یک سو به واسطه پوشش گیاهی مطلوب، توان حفظ رطوبت خاک و پویایی اکوسیستم، بیشترین میزان کربن آلی ورودی به خاک را داشته‌اند، از سوی دیگر به دلیل مصون ماندن پوشش گیاهی از چرای دام قابلیت فرسایش‌پذیری کمتری نسبت به سایر مناطق داشته و نسبت کربن ورودی به خروجی افزایش یافته است. بنابراین، اگرچه انتظار می‌رود که وجود شرایط قرق در منطقه شیب افزایشی کربن آلی خاک را به دنبال داشته باشد، اما وقوع خشکسالی‌های پی در پی در این سال‌ها باعث شده است که نسبت ورودی کربن آلی خاک به خروجی آن نتواند ذخیره آن در خاک را بالا ببرد.

در این پژوهش هر دو ماهواره لندست ۷ و ۸ نتایج متناسبی را ارائه داده‌اند، اما نقشه‌های کربن آلی به دست آمده از این دو سنجنده حاکی از وجود تفاوت‌های محسوس در مقادیر برآوردی است. عوامل متعددی می‌تواند باعث تفاوت‌های موجود در نتایج ماهواره‌های لندست باشد. یکی از این عوامل وجود اختلاف زمانی چند روزه در عکس‌برداری سنجنده‌ها و به تبع آن اختلافات آب و هوایی به وجود آمده در این تأخیر زمانی است که باعث ایجاد تفاوت‌های اساسی در دقت عکس‌برداری سنجنده‌ها شده و نتایج متنوعی را به دست می‌دهد. عامل دیگر نیز می‌تواند حساسیت متفاوت سنجنده‌ها در ثبت پدیده‌های مختلف باشد. دلیل وجود نتایج ضد و نقیض در تحقیقات را می‌توان به عوامل زیادی از جمله شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر میزان مواد آلی و توزیع مکانی آن، وضعیت پوشش گیاهی، مواد معدنی و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و همچنین به مواد و روش‌های به کار گرفته شده نسبت داد و با انجام تحقیقات متعدد و در مناطق مختلف می‌توان به بررسی قابلیت داده‌های طیفی ماهواره‌ای در برآورد مشخصه‌های خاک پرداخت (۲۱).

در نهایت می‌توان گفت که به دست آوردن بهترین رابطه برای برآورد ماهواره‌ای کربن آلی خاک‌های مناطق جنگلی با توجه به متنوع بودن اکوسیستم جنگل از نظر گونه‌های گیاهی و توپوگرافی و همچنین متغیر بودن شرایط آب و هوایی این جنگل‌ها که در ارتفاع بالا قرار گرفته‌اند، بسیار پیچیده بوده و نیازمند دقت بالا، زمان زیاد و مطالعات متعدد می‌باشد. علاوه بر آن انتخاب سنجنده با قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب و استفاده از تصاویر با کیفیت بالا، تعیین زمان مناسب برای نمونه‌برداری زمینی و البته توان هماهنگی زمان نمونه‌برداری با زمان تصویربرداری از عوامل تأثیرگذار در افزایش دقت برآوردهای

ماهواره‌ای است. تفاوت‌های موجود در نتایج ماهواره‌های لندست در این تحقیق به خوبی اهمیت این موضوع را نشان می‌دهد.

References

1. Craswell, E.T., Lefroy, R.D.B., 2001. The role and function of organic matter in tropical soils. Nutrient Cycling in Agro ecosystems, 61(1/2): 7-18.
2. Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil. Climate Change, 51: 73-99.
3. Mallah Nokandeh, S., Homaee, M., Noroozi, A., 2014. Investigation on feasibility of estimating soil organic matter using Hyperion hyperspectral imagery in Ivanekey and Urmia. Watershed Engineering and Management, Vol. 6, Issue 3. (In Persian)
4. Danesh, M., Bahrami, H.A., Noroozi, A.A., 2011. A synchronous investigation of soil geometric mean particle diameter and lime, using remote sensing technology (case study: Pol-e-Dokhtar, the southwest of Lorestan province, Iran). J. Agr. Sci. Tech, 12, 479-494.
5. Stephens, S.C., Rasmussen, V.P., Ramsey, R.D., Whitesides, R.E., Searle, G.S., Newhall, R.L., 2005. Remote sensing organic carbon in soil. USU/NASA SGEP Projects; available online (15-09-05), www.extnasa.usu.edu/link_pages/downloads/remote_sensing_carbon.pdf.
6. Ben-Dor, E., Patkin, K., Banin, A., Karnieli, A., 2002. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data - a case study over clayey soils in Israel. Int. J. Remote Sens., 23(6): 1043-1062.
7. Dematte, M.J.A., Epiphanio, N.J.C., Formaggio, A.R., 2003. Influence of organic matter and iron oxides on the spectral reflectance of tropical soils. Bragantia, 62(3): 451-464.
8. Shirazi, M., Zehtabian, Gh., Alavipanah, S.K., 2010. Applicability of IRS Satellite Images for Surveying Water, Soil and Vegetation Cover Condition of Najm Abad Region, Savojbolagh. Journal of Natural Environmental, Iranian Journal of Natural Resources, Vol. 63, No. 1, pp.33-51. (In Persian)
9. Mohamadi, J., 2006. Pedometer. Vol. 2 (Spatial statistics). Pelk Publications, p. 453. (In Persian)
10. Hanquet, B., Sirjacobs, D., Destain, M.F., Frankinet, M., Verbrugge, J.C., 2004. Analysis of soil variability measured with a soil strength sensor. Precision Agriculture, 5(3): 227-246.
11. Ladoni, M., 2009. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review. Springer Science+Business Media.
12. Henderson, T.L., Baumgardner, M.F., Franzmeier, D.P., Stott, D.E., Coster, D.C., 1992. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. Soil Science Society of America Journal, 56: 865–872.
13. Soan, Y.B., Gardner, W.D., Mishonov, A.V., Richardson, M.J., 2013. Model-based remote sensing algorithms for particulate organic carbon (POC) in the Northeastern Gulf of Mexico. J. Earth Syst. Sci, 118, 1-10.
14. Hummel, J.W., Sudduth, K.A., Hollinger, S.E., 2001. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil

sensor. Comput. Electron. Agr., 32(2): 149-165.

15. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Science, 63: 251-263.
16. Matinfar, H.R., Alavi Panah, S.K., Rafiei Emam, A., 2010. Remotely sensed data evaluation on soil spectral properties in arid regions. Iranian journal of Range and Desert Reseach, Vol. 16 No. (4). (In Persian)
17. Angstrum, 1925. Reflectance properties of soils. In: adv. In agronomy, 38: 1-44.
18. Ben-Dor, E., Banin, A., 1995. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. Soil Science Society of America Journal, Vol. 59, pp.364-372.
19. Sheklabadi, M., Khademi, H., Karimian Eghbal, M., Nourbakhsh, F., 2007. Effect of climate and long term grazing exclusion on selected soil biological quality indicators in rangelandas of centeral Zagros. Agricultural Sciences and Natural Resources, 41: 103-115. (In Persian)
20. Bagherifam, S., Karimi, A.R., Lakzian, A., Izanloo, E., 2013. Effects of land use management on soil organic carbon, particle size distribution and aggregate stability along hillslope in semi-arid areas of northern Khorasan. Journal of Water and Soil Conservation, Vol. 20(4). (In Persian)
21. Shataee, Sh., Hossein Ali zadeh, M., Ayoubi, Sh., 2007. Study on the potential of ETM^+ spectral data in assessing soil surface organic matter (Case study: a part of rangelands of Mehr watershed Sabzevar, Iran). Journal of Rangeland, No. 1, pp.67-78. (In Persian)