



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۱  
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.14, No. 2, Summer 2022

۱-۱۸

مقاله پژوهشی

## ارزیابی ذخایر کربن آلی خاک در کاربری‌های گوناگون با استفاده از روش‌های آماری حداقل مربعات جزئی، زمین‌آمار، مدل درختی M5 و تصاویر لندست ۸

علیرضا ظهیرنیا<sup>۱</sup>، حمیدرضا متین‌فر<sup>۲\*</sup>، حسینعلی بهرامی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

### چکیده

کربن آلی نقشی حیاتی در پایداری زیست‌محیطی، شاخص کیفیت و سلامت خاک دارد؛ بنابراین شناسایی توزیع مکانی ترسیب کربن از الزامات برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت خاک است. پژوهش حاضر به منظور بررسی میزان ترسیب کربن در کاربری‌های کشت و صنعت نیشکر، کشاورزی سنتی و بایر انجام شد. در هر کاربری، شصت نمونه خاک برداشت و کربن آلی، شوری، آهنک، واکنش خاک و سدیم محلول خاک اندازه‌گیری شد. با استفاده از داده‌های طیفی سنجنده OLI و TIRS ماهواره لندست ۸، مقادیر باندها و شاخص‌های خاکی و پوشش گیاهی شامل SAVI، NDVI، SAVI، TSAVI، OSVI، MSVI، SOCI، WDV، PVI، RVI و BI در نقاط نمونه‌برداری به‌دست آمد و رابطه بین آنها و مقدار ماده آلی خاک محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین همبستگی را با مقدار ماده آلی خاک به خود اختصاص داده‌اند: در کاربری کشت و صنعت، شاخص SOCI با  $0.50/30\%$  و باند ۳ با  $0.53/82\%$ ؛ در کشاورزی سنتی، شاخص PVI با همبستگی  $0.60/35\%$  و باند ۷ با  $0.60/63\%$ ؛ در اراضی بایر، شاخص RVI با همبستگی  $0.34/27\%$  و باند ۲ با  $0.36/67\%$ . نتایج تحلیل آماری به‌روش برآزش حداقل مربعات جزئی نشان داد میانگین نتایج واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب  $0.43/48\%$  و  $0.39/0.8\%$  است. نتایج برآورد ماده آلی خاک به‌روش کریجینگ و مدل درخت M5 نشان می‌دهد که همبستگی مقادیر ماده آلی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده به‌ترتیب  $0.66/20\%$  و  $0.82/00\%$  بود. طبق این نتایج، بین مقادیر ماده آلی خاک و شاخص‌ها و باندهای ماهواره لندست ۸ همبستگی معنی‌داری وجود دارد و می‌توان مقادیر ماده آلی خاک منطقه مورد مطالعه و سایر مناطق دارای شرایط مشابه را با احتمال مورد قبولی تخمین زد.

کلیدواژه‌ها: ماده آلی خاک، جنوب‌غرب خوزستان، روش آماری PLSR، روش کریجینگ، مدل درختی M5.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشکده کشاورزی، گروه علوم مهندسی خاک، دانشگاه لرستان. تلفن: ۰۹۱۲۳۴۵۰۹۶۹

## ۱- مقدمه

نیز ممکن است به افزایش حاصلخیزی خاک بینجامد (Khayamim et al., 2015). با توجه به اینکه بیشترین مقدار ماده آلی در لایه سطحی خاک قرار دارد و با افزایش عمق، مقدار آن کاهش می‌یابد، پس خاک با افزایش عمق، کمتر تحت تأثیر فرایندهای ناشی از مواد آلی قرار خواهد گرفت (Jiang et al., 2016).

شاخصی مهم، برای تشخیص سلامت و پایداری اکوسیستم، وضعیت مواد آلی و یا کربن آلی خاک است که اطلاعات مفیدی درباره تغییرات حاصلخیزی خاک و تخریب اراضی فراهم می‌آورد (Wang et al., 2018). بررسی تأثیرات مدیریت‌های متفاوت اراضی در تغییرات ماده آلی در دشت‌ها، مراتع و اراضی بایر مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌منظور برقراری شرایط پایدار در اکوسیستم، ضروری است (Chen et al., 2014; Cambou et al., 2016). مقدار کربن آلی به‌شدت تحت تأثیر تغییر کاربری و مدیریت اراضی قرار می‌گیرد (Lorenz et al., 2008). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد کربن آلی خاک بسیار سریع‌تر از کربن کل به هرگونه تغییر در مدیریت و کاربری اراضی واکنش نشان می‌دهد (Christensen, 2001).

به‌منظور تعیین توزیع کربن آلی در خاک، تکنیک‌های گوناگونی مانند نمونه‌برداری شبکه‌ای و یا منطقه‌ای به‌کار می‌رود. از آن‌جا که نمونه‌برداری خاک از نظر فنی دشوار و پرهزینه و آماده‌سازی نمونه‌ها نیز برای تجزیه و تحلیل زمان‌بر است، همواره تعداد محدودی نمونه از اراضی تهیه و آنالیز می‌شود (Senthilkumar et al., 2009). بیان مقدار کربن آلی خاک در اراضی و در قالب کمیته عددی همچون میانگین کلی مقدار کربن آلی خاک، به‌ویژه در اراضی پهناور، کافی نیست و نیاز مبرم به روش‌های کم‌هزینه و دقیق‌تر احساس می‌شود (López et al., 2005). در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های نوآمد و کم‌هزینه و سریع مانند فتاوری سنجش از دور، به‌علت توانایی در شناسایی پدیده‌ها، همواره مورد توجه بوده است (Bongiovanni & Lobartini, 2006).

فرایند افزایش جمعیت مستلزم تولید بیشتر محصولات کشاورزی و در نتیجه، فشار بیشتر به عرصه‌های منابع طبیعی است. این فرایند عامل اصلی گرایش به تغییر کاربری اراضی و استفاده بیشتر از نهاده‌ها در اراضی کشاورزی است (Lal, 1997). کشور ایران، با میانگین بارش سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر، یکی از کم‌آب‌ترین کشورهای جهان با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است. مقدار و کیفیت ماده آلی خاک در حاصلخیزی، مدیریت کوددهی و آبیاری محصولات گوناگون کشاورزی اهمیت فراوانی دارد (Mahmoudzadeh et al., 2020)؛ از این‌رو، در دشت‌های وسیع کشور، لزوم تهیه نقشه ماده آلی خاک کاملاً احساس می‌شود. کیفیت نمونه‌برداری و دقت در آنالیزهای آزمایشگاهی، در فرایند تهیه نقشه ماده آلی خاک، اهمیت فراوانی دارد (Mehrabi Gohari E. et al., 2020). مهم‌ترین متغیرهایی که مقدار ماده آلی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارت‌اند از مقدار بارندگی و دما، بافت خاک، ارتفاع و جهت شیب اراضی.

مقدار کربن ذخیره‌شده در خاک حاصل تعادل بلندمدت بین دو فرایند مهم زیستی است که باعث تولید مواد آلی، از یک‌سو و تجزیه این مواد، از سوی دیگر می‌شود (Liu et al., 2014). تفاوت در محتوای کربن آلی موجود در اکوسیستم‌های گوناگون تا حد زیادی به عوامل خاک و اقلیم بازمی‌گردد؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد رس خاک و بارندگی سالیانه، بهبود می‌یابد و بر اثر افزایش میانگین دمای سالیانه، دچار کاهش می‌شود. اسیدهای حاصل از تجزیه مواد آلی و هوموس خاک نیز عامل مؤثری در کاهش pH خاک شمرده می‌شوند (McDowell et al., 2012). این فرایند، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که pH خاک‌ها اغلب قلیایی تا کمی قلیایی است و تحت تأثیر کربنات‌ها قرار دارد، دارای اهمیت بیشتری است. از جنبه دیگر، کاهش هرچند اندک pH خاک می‌تواند باعث افزایش حلالیت عناصر کم‌مصرف شود و خود این

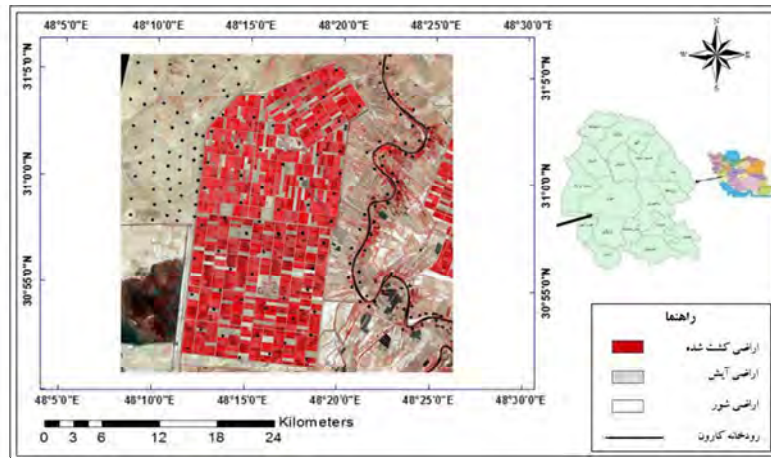
اکوسیستم‌های خشک و بازتابش‌های شدید سطحی خاک مربوط دانستند که باعث کاهش توانایی سنجش از دور در برآورد کربن آلی خاک می‌شود. اما در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک و مرطوب، توانایی سنجش از دور و شاخص‌های گیاهی در برآورد کربن آلی خاک به اثبات رسیده است. با توجه به کمی بودن داده‌های سنجش از دور و وجود همبستگی بین شاخص‌های مرتبط با مقدار کربن آلی خاک حاصل از داده‌های سنجش از دور و مقادیر اندازه‌گیری شده کربن آلی در آزمایشگاه، با استفاده از این تکنیک می‌توان سرعت و دقت تهیه نقشه‌های کمی کربن آلی خاک را افزایش داد (Simbahan et al., 2006). در مقایسه با روش‌های رایج، نقشه‌برداری رقومی و مدل‌سازی<sup>۱</sup> بررسی مقادیر و تغییرات مکانی کربن آلی خاک دارای دقت و سرعت بسیار بیشتری است (Vasques et al., 2010; Wiesmeier et al., 2011). همچنین در مدل‌هایی که از داده‌های سنجش از دور در ساختار خود استفاده می‌کنند، توانایی پیش‌بینی تغییرات مکانی کربن آلی خاک به مراتب بیشتر است (Mulder et al., 2011; Minasny et al., 2011) و علت آن نیز توانایی این مدل‌ها در ثبت و برآورد مستقیم و غیرمستقیم ویژگی‌های خاک است؛ از این رو استفاده از داده‌های سنجش از دور در مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی کربن آلی خاک، در مناطقی که به‌علت وسعت زیاد و نداشتن دسترسی به آنها امکان نمونه‌برداری فراهم نیست، ارزش بسیار دارد (Mahmoudzadeh et al., 2020). در همین زمینه، (Ghorbani, Kh. et al., 2016) در پژوهشی که در شمال شرق کشور انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که کاربرد مدل‌های داده‌کاوی مانند M5، در مقایسه با مدل‌های مفهومی، به بهبود نتایج نهایی منجر می‌شود. مدل M5، به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای مورد نظر، معادلات مشخصی در اختیار می‌گذارد و در قیاس با دیگر مدل‌های مشابه، دقت بیشتری دارد.

## 1. Digital Soil Mapping and Modeling (DSMM)

تصاویر ماهواره‌ای یکی از منابع تأمین‌کننده داده‌های مکان‌مند شمرده می‌شوند که بر دیگر منابع متداول (مانند نقشه‌ها و عکس‌های هوایی) برتری‌های متعددی دارند؛ از آن جمله می‌توان به پوشش وسیع، تکرار شونده‌گی منظم، کاهش حجم عملیات میدانی، کاهش هزینه و نیز به‌هنگام‌بودن داده‌ها اشاره کرد (Benni & Amal, 2010). بررسی مقدار کربن آلی خاک با استفاده از روش‌های معمول و قدیمی، علاوه‌بر زمان‌بر بودن، هزینه‌های فراوانی را در پی خواهد داشت. در این زمینه، سنجش از دور روش بسیار مفیدی است که می‌توان از آن، به‌منظور به‌دست‌آوردن لایه‌های اطلاعاتی از خاک و پوشش گیاهی دشت‌ها و مناطق گوناگون، استفاده کرد. ویژگی‌هایی مانند فراهم‌آوردن دید وسیع و یکپارچه از منطقه، تکرارپذیری، در دسترس بودن اطلاعات و دقت بالای آنها، صرفه‌جویی در زمان و هزینه از جمله دلایلی است که استفاده از این گونه اطلاعات را، به‌منظور بررسی مقدار ماده آلی خاک و نیز کنترل تغییرات آن، بر دیگر روش‌های رایج ارجحیت می‌بخشد. کاربرد روش‌های نوین سنجش از دور تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از شاخص‌های طیفی مبتنی بر بازتاب طیفی پدیده‌ها می‌تواند نتایج رضایت‌بخش و مطلوبی برای پژوهشگران داشته باشد (Guo et al., 2019).

نتایج تحقیقات (Rahmati, M., et al., 2016) نشان داد، با استفاده از داده‌های سنجنده<sup>+</sup> ETM<sup>+</sup> ماهواره<sup>۷</sup> لندست و کاربرد برازش‌های خطی و غیرخطی، امکان تخمین مقدار کربن آلی خاک در مناطق بدون پوشش گیاهی امکان‌پذیر است اما حضور مستقیم پوشش گیاهی تأثیر منفی در نتایج خواهد گذاشت. در همین زمینه، (Katsuhisa, N. et al., 2011) در تحقیقاتشان شاخص‌های سنجش از دور گیاهی شامل NDVI، SAVI و RVI را که از تصاویر ماهواره<sup>۸</sup> لندست استخراج شده بودند، بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه با مقدار کربن آلی ذخیره‌شده در خاک رابطه<sup>۹</sup> معنی‌داری نداشت. این محققان دلیل اصلی این نتیجه را به





شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و خوزستان به همراه نقاط نمونه‌برداری شده

### ۲-۳- داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های ماهواره لندست ۸، به‌علت چندطیفی‌بودن، امکان مطالعه منابع گوناگون در طول موج‌های متنوعی، از مرئی تا مادون قرمز را فراهم آورده است. توان تفکیک مکانی این ماهواره برای باند پانکروماتیک، پانزده متر و برای باندهای معمول، سی متر است. داده‌های این ماهواره شامل یازده باند می‌شود که هر شانزده روز یک‌بار، با استفاده از سنجنده، تصویربرداری می‌شوند. در پژوهش حاضر، از تصویر سنجنده OLI-TIRS متعلق به ماهواره لندست ۸ و تاریخ ۲۲ ژوئن ۲۰۲۰، مطابق با دوم تیر ۱۳۹۹، استفاده شد. تصویر مورد استفاده متعلق به مسیر<sup>۱</sup> ۱۶۵ و ردیف<sup>۲</sup> ۳۹ است. تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری (به‌روش FLAASH) روی تصاویر انجام شد. نقشه‌های در دسترس از منطقه مورد مطالعه اسکن و ژئورفرنس شدند و به‌منزله نقشه پایه به‌کار رفتند.

### ۲-۴- روش تحقیق

به‌منظور اجرای این پژوهش در تیر ۱۳۹۹، براساس تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های موجود، بازدیدهای میدانی و روش هایپرکیوب، ۱۸۰ نقطه نمونه‌برداری (در هر کاربری، شصت نقطه و با فواصل بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر)

روی نقشه مشخص شد و نمونه برداری از خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر)، در روزهای نزدیک به زمان تصویربرداری ماهواره‌ای، صورت گرفت (Mehrabi et al., 2019). موقعیت دقیق هر نقطه نمونه‌برداری از طریق GPS ثبت شد. پس از نمونه‌برداری و ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه، ابتدا سنگریزه، ریشه و سایر ناخالصی‌ها از نمونه‌ها جدا شد و در مرحله بعد خاک هواخشک، کوبیده و از الک دومیلی‌متری عبور داده شد. مقدار کربن آلی نمونه‌های خاک آماده‌شده به‌روش (Walkly A. and Balck I., 1934) تعیین شد. سپس، از نمونه‌های خاک، گل اشباع تهیه و واکنش خاک (pH) در آن تعیین شد. در ادامه، از گل اشباع عصاره‌گیری شد و هدایت الکتریکی، کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در آن تعیین شد. پس از آن، وزن مخصوص ظاهری نمونه‌های دست‌نخورده که با استفاده از استوانه فلزی تهیه شده بودند، تعیین شد. در مرحله بعد، با استفاده از رابطه (۱)، مقدار ذخیره کربن آلی خاک تعیین شد.

$$TC_{Stock} = TC_{Conc.} \times \rho zc \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. WRS-Path
2. WRS-Row

سپس با استفاده از دستور extract، اعداد رقومی<sup>۱</sup> متناظر با هر نقطه استخراج و به نرم‌افزار اکسل و سپس به نرم‌افزارهای آماری منتقل شد. آزمون نرمال بودن داده‌ها در نرم‌افزار SAS به روش Shapiro-Wilk انجام شد. در مرحله بعد، نتایج در نرم‌افزار Minitab بررسی و در ادامه، نرمال‌سازی داده‌ها به شیوه‌های Box-Cox و Johnson صورت پذیرفت. سپس آزمون T جفتی و آزمون همبستگی داده‌ها در نرم‌افزار SPSS انجام و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نقشه پراکندگی ماده آلی خاک، به روش کریجینگ، تهیه شد.

#### ۲-۴-۳- روش درون‌یابی کریجینگ

در پژوهش حاضر، به منظور تخمین درصد ماده آلی خاک، از روش کریجینگ استفاده شد و نرمال‌کردن داده‌های اولیه آزمایشگاهی با روش تبدیل لگاریتمی انجام پذیرفت. پس از بررسی شکل تغییر نماهای حاصل<sup>۲</sup>، وضعیت همسان‌گردی<sup>۳</sup> و ناهمسان‌گردی<sup>۴</sup> آنها ارزیابی و در نهایت، مدل کروی در شرایط ناهمسان‌گرد انتخاب شد. در نمودار تغییر نمای ترسیم‌شده،

TC<sub>Stock</sub> ذخیره کربن آلی خاک براساس  $\text{Kg.m}^{-2}$ ، TC<sub>Conc.</sub> مقدار کربن آلی خاک براساس  $\text{g.Kg}^{-1}$ ،  $\rho$  وزن مخصوص ظاهری خاک ( $\text{g.cm}^{-3}$ )، z عمق خاک (cm) و c ضریب تصحیح ثابت (۰/۰۱) است.

#### ۲-۴-۱- محاسبه شاخص‌های طیفی

در این پژوهش، از بین شاخص‌های گوناگون، ده شاخص شامل OSAVI، TSAVI، SAVI، NDVI، MSACI، SOC1، PVI، WDVI، RVI و BI محاسبه شد و همبستگی بین نتایج داده‌های آنها و مقدار ماده آلی خاک مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱).

#### ۲-۴-۲- استخراج اطلاعات طیفی، پردازش‌های آماری و تهیه نقشه‌های لازم

به منظور استخراج اطلاعات طیفی از ده شاخص مورد مطالعه، مختصات ۱۸۰ نقطه نمونه برداری شده به همراه تصویر ماهواره‌ای مورد نظر که تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری (به روش FLAASH) روی آنها انجام گرفته است، به محیط نرم‌افزار ArcGIS انتقال یافت.

جدول ۱. شاخص‌های پوشش گیاهی مورد مطالعه

شاخص	رابطه	تعاریف
NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Normalized Different Vegetation Index
TSAVI	$\frac{s \times (NIR - (s \times R) - a)}{(a \times (NIR + R) - (a \times s) + X \times (1 + s^2))}$	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
WDVI	$NIR - (S \times R)$	Weighted Divergence Vegetation Index
SOCI	$\frac{Blue (band 2)}{Red (band 4) \times Green (band 3)}$	Soil Organic Carbon Index
PVI	$\frac{NIR - (a \times R) - b}{\sqrt{1 + a^2}}$	Perpendicular Vegetation Index
RVI	$NIR/R$	Ratio Vegetation Index
BI	$\sqrt{R^2 + NIR^2}$	Brightness Index

1. Digital Number
2. Variogram
3. Isotropic Variogram
4. Anisotropic Variogram

مدل زیرمجموعه‌ای از روش‌های یادگیری ماشینی و داده‌کاوی است. داده‌کاوی به فرایند جست‌وجو و کشف مدل‌های گوناگون، مختصرسازی‌ها و دریافت مقادیر از مجموعه‌ای از مقادیر معلوم گفته می‌شود (Lohani et al., 2012). روش‌های داده‌کاوی برای مجموعه داده‌های بزرگ با متغیرهای فراوان ایجاد شده‌اند؛ بنابراین با روش‌های آماری قدیمی و متداول که برای مجموعه داده‌های کوچک با متغیرهای اندک طراحی شده‌اند، تفاوت دارند. روش‌های بر مبنای درخت<sup>۱</sup> یکی از تکنیک‌های داده‌کاوی است که در آنها، خروجی به صورت مدل یا سازه‌ای درختی است و با استفاده از داده‌های ورودی و خروجی ترسیم شده است. الگوریتم M5 رایج‌ترین روش طبقه‌بندی به کاررفته در خانواده مدل‌های تصمیم‌گیری شمرده می‌شود. این مدل یک الگوریتم پیش‌بینی عددی است و گره‌های درخت با ویژگی بیشینه خطاهای مورد انتظار، به‌منزله تابعی از انحراف استاندارد پارامترهای خروجی، انتخاب می‌شوند. درخت تصمیم معمولاً از چهار بخش ریشه<sup>۱۰</sup>، شاخه<sup>۱۱</sup>، گره‌ها<sup>۱۲</sup> و برگ‌ها<sup>۱۳</sup> تشکیل شده و گره‌ها با دایره نشان داده می‌شود. نخستین مرحله ایجاد مدل درختی استفاده از معیار انشعاب مناسب است. معیار انشعاب برای الگوریتم M5 براساس عملکرد انحراف استاندارد مقادیر هر کلاس و یا طبقه است که در هر گره به دست آمده است. این روش اساس روش‌های طبقه‌بندی محسوب می‌شود که آنتروپی<sup>۱۴</sup> نام دارند. آنتروپی را می‌توان به صورت معیار آشفتنگی و بی‌نظمی یک سیستم تفسیر کرد. شکل ۲ ساختاری درختی را نشان می‌دهد که براساس روش‌های آموزشی مربوط به مدل M5 ساخته شده است.

پارامتر شعاع تاثیر<sup>۱</sup> در محور افقی و پارامترهای اثر قطعه‌ای<sup>۲</sup> و آستانه<sup>۳</sup> در محور عمودی قرار دارند. در ادامه، با هدف تعیین مقادیر نقاط مجهول در روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ، تعداد بیست همسایه به کار رفت. تابع تغییر نما ابزار کلیدی در نظریه متغیرهای ناحیه‌ای به‌شمار می‌رود. این تغییر نما، که اصطلاحاً تغییرنمای تجربی نامیده می‌شود، عبارت است از متوسط مجذور اختلافات بین دو مشاهده  $(z(x), z(x+h))$ ، در دو موقعیت مکانی واقع در فضای نمونه‌برداری که با آرایه<sup>h</sup> از هم جدا شده‌اند. تغییر نمای تجربی را می‌توان برای جهت‌های متفاوت جغرافیایی و نیز شبکه‌های نمونه‌برداری منظم و نامنظم محاسبه کرد. با توجه به ابعاد شبکه نمونه‌برداری، تغییر نماهای تجربی براساس گام‌های گوناگون محاسبه می‌شود. اغلب مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله، مقادیر تغییر نما به تدریج تا فاصله معینی، افزایش می‌یابد و فراتر از آن، به حد ثابتی می‌رسد که حد آستانه نامیده می‌شود. حد آستانه مقدار عددی تغییر نما در شرایطی است که تابع مورد نظر فاقد هرگونه صعود و نزول مشخصی باشد. در چنین فاصله‌ای، مقدار تغییر نما به مقدار واریانس داده‌ها نزدیک می‌شود و معادل کوواریانس در گام صفر می‌شود. فاصله‌ای که طی آن تغییر نما به حد ثابت و مشخص خود می‌رسد اصطلاحاً دامنه تاثیر<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. این فاصله بیانگر فاصله‌ای است که پس از آن، نمونه‌ها در هم تاثیر ندارند و مقادیر مشاهده‌شده و یا نمونه‌برداری‌شده را می‌توان مستقل از یکدیگر محسوب کرد. با بهره‌گیری از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات<sup>۵</sup>، MBE<sup>۶</sup> و ضریب همبستگی<sup>۷</sup> داده‌های واقعی و تخمینی، دقت تخمین‌ها و نقشه‌های به دست آمده از روش کریجینگ ارزیابی شد. در گام بعدی، با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS، نقشه کریجینگ نهایی ترسیم و تغییرات مقادیر ماده آلی خاک روی آن نشان داده شد.

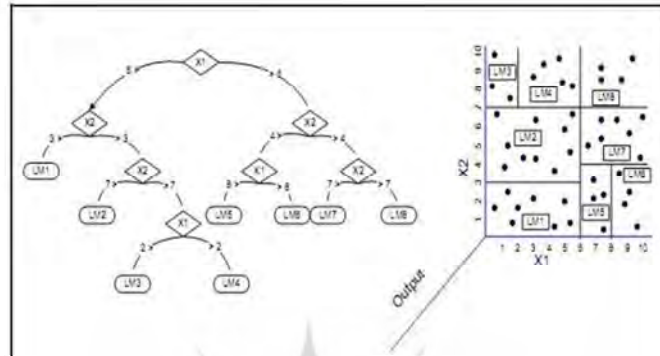
#### ۲-۴-۴-۲ مدل درختی M5

مدل درختی M5 را کوئینلان<sup>۸</sup> (۱۹۹۲) مطرح کرد. این

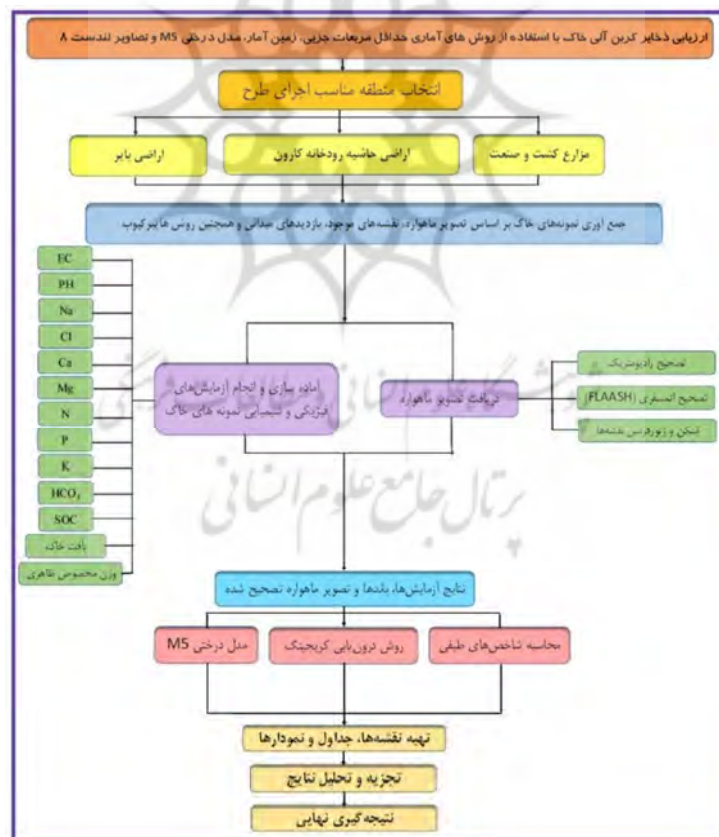
- |                                  |                       |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1. Range                         | 2. Nugget             |
| 3. Sill                          | 4. Range of Influence |
| 5. Root Mean Square Error (RMSE) |                       |
| 6. Mean Bias Error               |                       |
| 7. Correlation Coefficient       |                       |
| 8. Quinlan                       | 9. Tree Based Methods |
| 10. Root                         | 11. Beach             |
| 12. Nodes                        | 13. Leafs             |
| 14. Entropy                      |                       |

مقادیر هدف موارد دیده‌نشده سنجیده می‌شود. در پژوهش حاضر، مدل درختی M5 با استفاده از نرم‌افزار وکا<sup>۱</sup> اجرا شد. الگوریتم فعالیت‌های انجام‌شده در این پژوهش، به‌صورت خلاصه، در شکل ۳ آورده شده است.

در این شکل، دامنه پارامترهای ورودی ۱ و ۲ است. مدل مذکور، معیار انشعاب بیانگر مقدار خطا در آن گره است و مدل حداقل خطای مورد انتظار را به‌منزله نتیجه آزمایش هر صفت در آن گره، محاسبه می‌کند. معمولاً خطای مدل با اندازه‌گیری دقت پیش‌بینی



شکل ۲. نمونه‌ای از مدل درختی M5



شکل ۳. الگوریتم فعالیت‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر



### ۳- نتایج و بحث

نشان می‌دهد که تفاوت آماری مقدار کربن آلی خاک بین این مناطق، در سطح احتمال ۱٪ ( $\alpha=0/01$ ) معنی‌دار است اما، بین کاربری سنتی و اراضی بایر، اختلاف معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵٪ دیده نمی‌شود (جدول ۳ و شکل ۴).

خلاصه آماری تجزیه نمونه‌های خاک، در کاربری‌های سه‌گانه منطقه مورد مطالعه، در جدول ۲ آورده شده است. نتایج آزمون آماری T جفتی بین سه منطقه مورد مطالعه (کشت و صنعت، کشاورزی سنتی و اراضی بایر)

جدول ۲. کاربری‌ها و خصوصیات آماری برخی از ویژگی‌های مورد مطالعه

نوع کاربری	ویژگی	خصوصیات آماری			
		تعداد	میانگین	حداقل	حداکثر
کشت و صنعت	EC (ds/m)	۶۰	۴/۸۷	۲/۲۳	۶/۹۴
	pH	۶۰	۷/۰۹	۶/۶۹	۷/۴۴
	SAR	۶۰	۴/۴۳	۲/۳۵	۶/۷۹
	OM (%)	۶۰	۱/۰۳	۰/۶۲	۱/۵۶
	TC <sub>Stock</sub> (Kg.m <sup>-2</sup> )	۶۰	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۴۴
رده‌بندی Typic Torrifluents					
کشاورزی سنتی	EC (ds/m)	۶۰	۸/۵۴	۶/۰۲	۲۱/۴۸
	pH	۶۰	۷/۸۱	۷/۰۱	۸/۱۹
	SAR	۶۰	۶/۸۴	۵/۱۷	۱۰/۹۳
	OM (%)	۶۰	۰/۵۴	۰/۳۲	۰/۸۵
	TC <sub>Stock</sub> (Kg.m <sup>-2</sup> )	۶۰	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۲۲
رده‌بندی Typic Torrifluents					
اراضی بایر	EC (ds/m)	۶۰	۱۲۸/۴۰	۴۹/۹۰	۲۴۳/۲۰
	pH	۶۰	۸/۰۲	۷/۲۱	۸/۴۱
	SAR	۶۰	۲۹/۵۹	۱۲/۳۴	۴۳/۲۰
	OM (%)	۶۰	۰/۵۱	۰/۳۲	۰/۷۵
	TC <sub>Stock</sub> (Kg.m <sup>-2</sup> )	۶۰	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۱۸
رده‌بندی Typic Haplocalcids					
سراسر منطقه	EC (ds/m)	۱۸۰	۴۷/۲۷	۲/۲۳	۲۳۴/۲۰
	pH	۱۸۰	۷/۶۴	۶/۶۹	۸/۴۱
	SAR	۱۸۰	۱۳/۶۲	۴۳/۲۰	۲/۳۵
	OM (%)	۱۸۰	۰/۶۹	۱/۵۶	۰/۳۲
	TC <sub>Stock</sub> (Kg.m <sup>-2</sup> )	۱۸۰	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۴۴
رده‌بندی Typic Torrifluents و Typic Haplocalcids					



شکل ۴. مقایسه میانگین درصد ماده آلی خاک در سه منطقه مورد مطالعه

جدول ۳. نتایج آزمون T جفت شده بین درصد ماده آلی خاک در کاربری‌های متفاوت منطقه مورد مطالعه

نوع کاربری	تعداد نمونه‌ها	میانگین (%)	Sig. (2-tailed)
کشت و صنعت	۶۰	۱/۰۳	**/۰۰۰۰
کاربری	۶۰	۰/۵۴	
کشت و صنعت	۶۰	۱/۰۳	**/۰۰۰۰
اراضی بایر	۶۰	۰/۵۱	
کاربری	۶۰	۰/۵۴	ns/۰۳۷۲
اراضی بایر	۶۰	۰/۵۱	

\*\* وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪، ns نبود اختلاف آماری معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵٪

نتایج نشان می‌دهد کمیت ماده آلی خاک در مزارع کشت و صنعت که اغلب بیش از پانزده سال است که کشت متمرکز نیشکر در آنها انجام شده و کمتر در معرض تخریب‌های محیطی بوده‌اند، مقدار بالاتری را نشان داده است و تفاوت آماری معنی‌داری با دو کاربری دیگر این منطقه، یعنی اراضی کشاورزی سنتی و اراضی بایر، دارد (شکل ۴). بدین ترتیب میانگین ماده آلی خاک سطحی در اراضی بایر از ۰/۵۱٪ به ۱/۰۳٪ رسیده است. افزایش نیافتن ماده آلی خاک ممکن است به عوامل متعددی بازگردد؛ مانند تردد ماشین‌آلات سنگین بابت عملیات متفاوت کشاورزی، شخم، مصرف سموم گوناگون آفت‌کش و حشره‌کش، دمای بالای محیط و مرطوب بودن خاک بر اثر آبیاری طی فصل‌های گرم سال. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) نیز، در تحقیقات خود، مشابه این نتایج را گزارش و اعلام کرده‌اند که مقدار کربن آلی در مراتع ضعیف و کشت دیم، در قیاس با کاربری مرتع خوب و متراکم، اختلافی معنی‌دار در سطح ۱٪ دارد.

۳-۱- نتایج همبستگی بین مقدار ماده آلی خاک، باندهای ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های مورد مطالعه بررسی میانگین شاخص‌ها، در سه منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد بازتاب‌های طیفی در منطقه دارای کاربری کشت و صنعت، به نسبت مناطق با کاربری سنتی و اراضی بایر، کمتر است. این مسئله بر اثر بالاتر بودن

معنی‌داری پوشش گیاهی و همچنین درصد ماده آلی خاک در اراضی کشت و صنعت، به نسبت دو کاربری دیگر است. نتایج همبستگی بین باندهای ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های مورد مطالعه در جدول ۴ آمده است. با توجه به این نتایج می‌توان اظهار داشت، به‌طور کلی همبستگی بین مقدار ماده آلی خاک سطحی و تمامی شاخص‌های مورد مطالعه در کاربری کشت و صنعت بیشتر از کشاورزی سنتی و اراضی بایر است. احتمال دارد این وضعیت نتیجه تأثیر شایان توجه ماده آلی در بازتاب طیفی خاک‌ها، به‌ویژه در کاربری کشت و صنعت باشد. در تاریخ تهیه تصویر (دوم تیر) مزارع نیشکر ارتفاع و تراکم مناسبی داشته‌اند؛ بنابراین نتایج به‌دست آمده از شاخص‌های گیاهی نشان‌دهنده تراکم بالای پوشش گیاهی این مزارع، در مقایسه با اراضی زیرکشت سنتی و زمین‌های بایر است. بیشترین همبستگی مشاهده شده بین ماده آلی و باندهای دو، سه و چهار ماهواره لندست ۸ (طول موج‌های مرئی) و نیز شاخص‌هایی بوده که به نوعی در محاسبات آنها از این باندها استفاده شده است. این باندها شدت بازتاب طول موج‌های قرمز، سبز و آبی و نیز بیشترین همبستگی را با ماده آلی از خود نشان می‌دهند. در این زمینه، نتایج مطالعات (Agbu P. A., et al. 1990) و (Bajwa S. G. and Tian, 2005 Niwa K. et al. 2011) نیز بر نتایج این پژوهش صحت می‌گذارند (جدول ۳). به‌طور کلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که اراضی دارای پوشش گیاهی با تراکم اندک‌اند، کاهش بیومس خاک سطحی و تأثیرات زمینه‌ای خاک در ارتباط بین ماده آلی خاک و شاخص‌های گیاهی نقش دارد؛ به همین علت در سال‌های اخیر، شاخص‌های جدیدی مانند RVI، PVI و SOCI تعریف شده‌اند. با به‌کاربردن این شاخص‌ها می‌توان تأثیرات زمینه‌ای خاک را حذف کرد و پوشش‌های گیاهی اندک و تنک و نیز مقدار تغییرات ماده آلی خاک را بهتر تخمین زد (Thaler et al., 2019).

ارزیابی ذخایر کربن آلی خاک در کاربری‌های گوناگون ...

جدول ۴. همبستگی هریک از باندهای ماهواره و شاخص‌های مورد مطالعه، در هریک از کاربری‌ها، با ماده آلی خاک

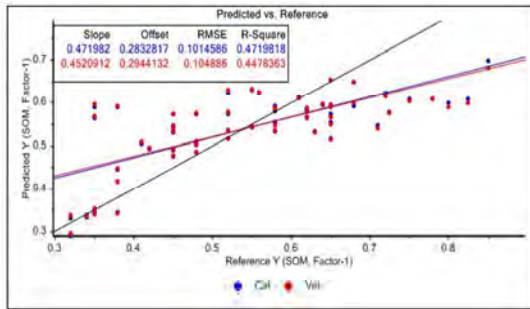
متغیر	کشت‌و صنعت		کشاورزی سنتی		اراضی بایر		تمامی نمونه‌ها	
	برازش پیرسون	پلی‌نومیال درجه دوم	برازش پیرسون	پلی‌نومیال درجه دوم	برازش پیرسون	پلی‌نومیال درجه دوم	برازش پیرسون	پلی‌نومیال درجه دوم
B2	۴۹/۰۸	۵۰/۴۰	۴۸/۲۷	۶۱/۲۴	۳۶/۲۴	۳۶/۶۷	۱۲/۰۱	۲۱/۰۱
B3	۵۰/۳۶	۵۳/۸۲	۴۷/۴۹	۶۰/۲۹	۳۴/۶۷	۳۵/۵۴	۱۲/۰۸	۲۰/۹۳
B4	۴۸/۰۴	۴۸/۶۰	۴۸/۰۳	۵۹/۵۱	۳۲/۴۴	۳۳/۷۹	۱۰/۹۷	۲۱/۵۲
B5	۱۱/۰۳	۲۶/۳۳	۶/۸۳	۱۱/۳۱	۲۷/۶۸	۲۹/۰۸	۲۷/۵۱	۳۰/۵۳
B6	۴۴/۸۰	۴۶/۲۶	۴۳/۵۶	۵۸/۵۰	۳۴/۴۳	۳۵/۹۲	۱۵/۰۷	۱۹/۳۴
B7	۴۲/۱۷	۴۲/۱۹	۴۵/۳۰	۶۰/۶۳	۳۱/۸۷	۳۳/۵۶	۱۱/۸۱	۱۸/۰۲
NDVI	۱۱/۷۵	۱۱/۷۷	۴۲/۳۰	۴۴/۵۰	۹/۸۴	۱۰/۰۹	۲/۶۱	۲/۸۶
TSAVI	۱۵/۶۸	۱۶/۶۷	۴۳/۸۱	۴۷/۳۱	۱۳/۴۲	۱۳/۸۷	۳/۱۲	۳/۴۲
WDVI	۱۳/۶۱	۱۴/۳۰	۴۰/۱۶	۴۲/۰۹	۱۵/۱۷	۱۵/۶۳	۲/۹۲	۳/۷۱
SOCI	۵۰/۲۹	۵۰/۳۰	۴۸/۴۱	۵۵/۱۶	۲۹/۷۴	۳۲/۰۸	۶/۵۶	۲۲/۲۱
SWIR1/NIR	۲۷/۲۸	۲۹/۳۱	۴۴/۱۸	۵۱/۷۲	۱۱/۳۵	۱۱/۷۲	۳/۰۷	۱/۴۶
SWIR2/NIR	۲۵/۹۴	۲۵/۹۸	۴۵/۸۰	۵۵/۱۷	۱۴/۷۹	۱۵/۸۰	۳/۷۸	۱/۷۸
PVI	۴۲/۴۶	۴۲/۸۳	۴۵/۹۰	۶۰/۳۵	۳۱/۲۶	۳۳/۲۸	۱۰/۱۱	۱۷/۷۱
BI	۱۳/۶۱	۱۴/۳۰	۳۸/۵۰	۳۹/۱۷	۱۵/۱۷	۱۵/۶۳	۲/۹۸	۳/۷۱
RVI	۳۳/۶۷	۳۳/۹۲	۴/۳۵	۲۴/۱۷	۳۲/۷۷	۳۴/۲۷	۲۲/۹۶	۲۳/۲۵
NDSI	۱۱/۴۳	۱۱/۸۸	۴۰/۱۶	۴۲/۰۹	۹/۷۰	۹/۹۸	۱/۶۵	۱/۹۸

از ۳۰٪ هستند (جدول ۴). یکی از دلایل کاهش شایان توجه ضرایب همبستگی، در اراضی بایر، کاهش بسیار زیاد مقدار ماده آلی در سطح خاک و تأثیر آن در وابستگی رابطه‌های مبتنی بر بازتابش طیفی و مقدار ماده آلی است. از دیگر دلایل می‌توان به افزایش شوری خاک سطحی، وجود لکه‌ها و پوسته‌های نمک در سطح خاک و کاهش شدید تراکم پوشش گیاهی در این اراضی اشاره کرد (جدول ۴).

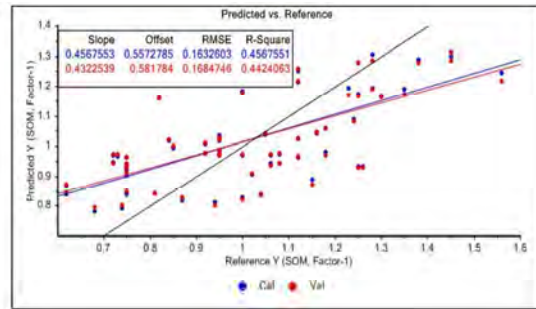
به‌منظور بررسی نقش داده‌های طیفی و شاخص‌ها در برآورد مقادیر ماده آلی خاک، در کاربری‌های سه‌گانه، از مدل برازش حداقل مربعات جزئی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد مقدار همبستگی ماده آلی خاک درمورد داده‌های واسنجی<sup>۱</sup> با داده‌های مذکور در کاربری‌های کشت‌و صنعت، کل نمونه‌ها، کشاورزی سنتی و اراضی بایر به‌ترتیب برابر است با ۴۷/۲۰، ۴۷/۱۸، ۴۵/۶۷ و ۳۳/۸۵٪ و میزان همبستگی ماده آلی خاک درمورد داده‌های اعتبارسنجی<sup>۲</sup> نیز، در کاربری‌های کشت‌و صنعت، کشاورزی سنتی، کل نمونه‌ها و اراضی بایر به‌ترتیب برابر است با ۴۴/۷۸، ۴۴/۲۴ و ۳۱/۶۹٪ (شکل ۵ و جدول ۵).

در کاربری کشت‌و صنعت، بیشترین همبستگی بین مقادیر ماده آلی و شاخص SOCI، در حالت برازش پلی‌نومیال درجه دوم، به‌مقدار ۵۰/۳۰٪ و در حالت پیرسون، به‌میزان ۵۰/۲۹٪ دیده می‌شود. پس از آن، شاخص PVI با میزان ۴۲/۸۳٪، در حالت برازش پلی‌نومیال درجه دوم و مقدار ۴۲/۴۶٪، در حالت پیرسون قرار دارد. در کاربری سنتی نیز بیشترین همبستگی بین مقادیر ماده آلی و شاخص PVI، در حالت برازش پلی‌نومیال درجه دوم، با ۶۰/۳۵٪ و در حالت پیرسون، به‌میزان ۴۵/۹۰٪ مشاهده شده است و پس از آن شاخص SOCI و SWIR2/NIR قرار دارند که طبعاً مقادیر همبستگی، در حالت برازش پلی‌نومیال درجه دوم، از پیرسون بیشتر است. در اراضی بایر، شاهد کاهش چشمگیر مقادیر همبستگی بین مقدار ماده آلی خاک سطحی و شاخص‌های مورد مطالعه هستیم؛ به‌طوری‌که شاخص RVI، با ۳۴/۲۷٪ در حالت برازش پلی‌نومیال درجه دوم و ۳۲/۷۷٪ در حالت پیرسون، بیشترین مقدار همبستگی را به خود اختصاص داده است. پس از شاخص مذکور، به‌ترتیب شاخص‌های PVI و SOCI قرار دارند که همگی دارای همبستگی بیشتر

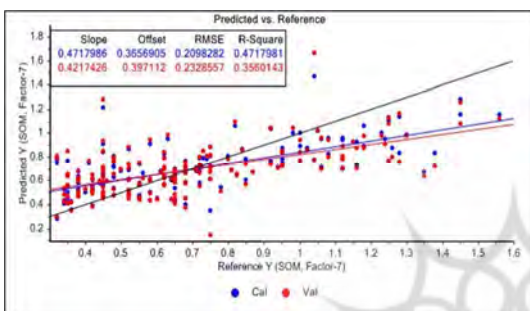
1. Calibration 2. Validation



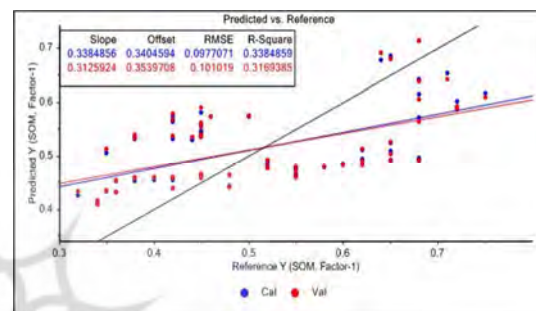
(کشاورزی سنتی)



(کشت و صنعت)



(اراضی بایر)



(تمامی نمونه‌ها)

شکل ۵. رابطه بین مقادیر ماده آلی خاک و باندها و شاخص‌های مورد مطالعه در کاربری‌های گوناگون منطقه مورد مطالعه، در روش آماری PLSR

جدول ۵. نتایج درصد همبستگی واسنجی و اعتبارسنجی مقدار ماده آلی خاک در کاربری‌های متفاوت

اعتبارسنجی (%)	واسنجی (%)	کاربری
۴۴/۷۸	۴۷/۲۰	کشت و صنعت
۴۴/۳۴	۴۵/۶۷	کشاورزی سنتی
۳۱/۶۹	۳۳/۸۵	اراضی بایر
۳۵/۶۰	۴۷/۱۸	تمامی نمونه‌ها
۳۹/۰۸	۴۳/۴۸	میانگین

مدل کریجینگ، می‌توان همبستگی بین درصد ماده آلی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را به خوبی نشان داد. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، براساس نتایج مدل کریجینگ، ضریب همبستگی بین درصد ماده آلی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برابر با ۰/۴۳/۸۰٪ و ضریب RMSE برابر با ۰/۱۶ است.

### ۳-۳- نتایج مدل M5

در مرحله بعد، عملکرد مدل درختی M5 در پیش‌بینی مقدار ماده آلی خاک لایه سطحی اراضی منطقه مورد مطالعه بررسی شد. نتایج حاصل از نرم‌افزار وکا، به صورت طرح درختی، در شکل ۹ آورده شده است. این شکل بیان می‌کند که با توجه به شرایط داده‌های وارد شده به مدل، به منظور پیش‌بینی مقدار ماده آلی

1. Semivariogram
2. Exponential

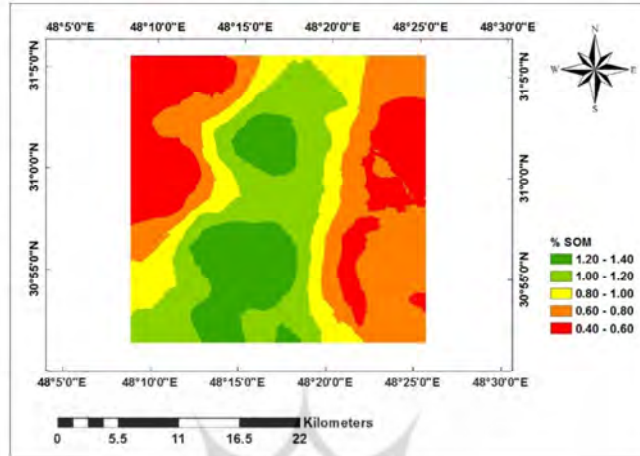
### ۳-۲- روش کریجینگ

به منظور بررسی توزیع مکانی مقدار ماده آلی خاک در نرم‌افزار Arc GIS، از روش کریجینگ استفاده شد. نتایج حاصل از استفاده این روش نیز نتایج آماری و مشاهدات زمینی را بار دیگر تأیید می‌کند (شکل ۶). در شکل ۷، نمودار نیمه‌تغییرنما (سمی‌واریوگرام) مدل کریجینگ، نوع نمایی<sup>۲</sup>، درصد ماده آلی خاک در نقاط نمونه‌برداری شده آورده شده است. با استفاده از نتایج

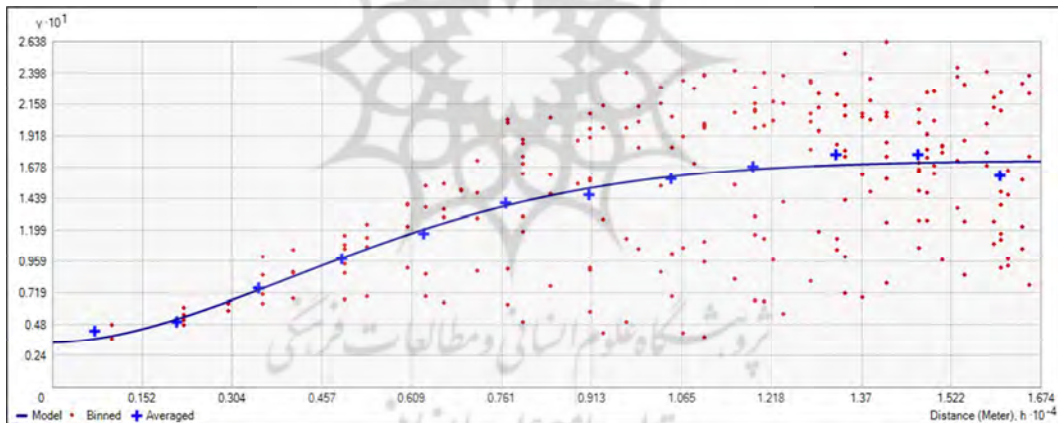
ارزیابی ذخایر کربن آلی خاک در کاربری‌های گوناگون ...

آلی اندازه‌گیری و محاسبه‌شده خاک سطحی این اراضی  
۶۷/۱۸٪ است.

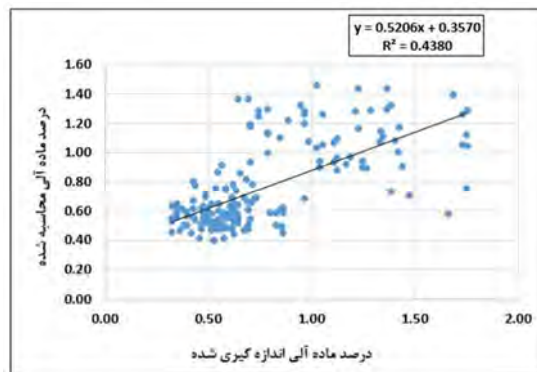
خاک لایه سطحی اراضی، یکی از پانزده رابطه ریاضی  
(مورد اشاره در جدول ۶) به کار خواهد رفت. با توجه به  
نتایج این مدل (شکل ۱۰)، همبستگی بین مقادیر ماده



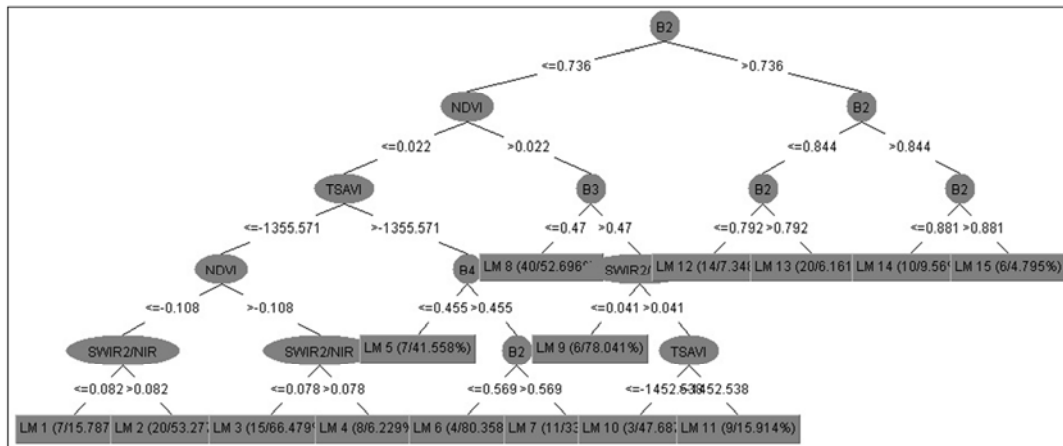
شکل ۶. نقشه توزیع مکانی ماده آلی خاک در اراضی منطقه مورد مطالعه، به روش کریجینگ



شکل ۷. نمودار نیمه‌تغییرنمای کریجینگ ماده آلی خاک در نقاط نمونه‌برداری شده



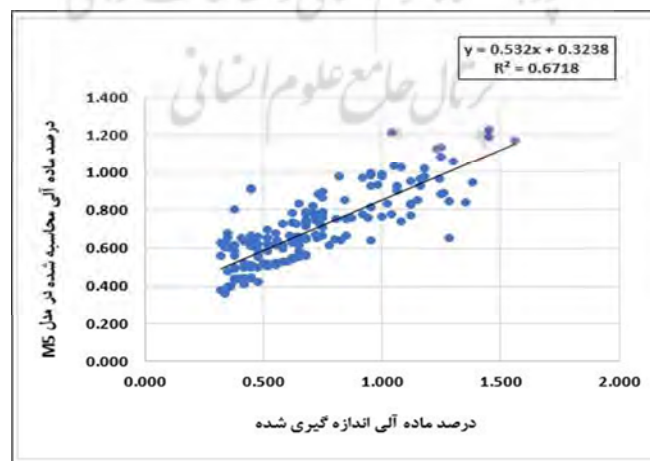
شکل ۸. همبستگی درصد ماده آلی اندازه‌گیری و محاسبه‌شده، با استفاده از نتایج روش کریجینگ



شکل ۹. مدل درختی M5 تهیه‌شده منطقه مورد مطالعه، براساس داده‌های واردشده در نرم‌افزار وکا

جدول ۶. روابط ریاضی به‌دست‌آمده از نرم‌افزار وکا در هریک از مراحل مدل درختی ارائه‌شده، به‌منظور محاسبه ماده آلی خاک

شماره رابطه	روابط ریاضی مطرح‌شده در مدل درختی نرم‌افزار وکا
1	$OM = -1.1234 * B2 - 1.6382 * B4 - 2.1836 * NDVI - 0.0003 * TSAVI - 0.579 * SWIR2/NIR + 1.9676$
2	$OM = -1.3393 * B2 - 1.6382 * B4 - 2.1836 * NDVI - 0.0003 * TSAVI - 1.9047 * SWIR2/NIR + 2.2598$
3	$OM = -0.55 * B2 - 1.6382 * B4 - 2.2871 * NDVI - 0.0003 * TSAVI - 7.5461 * SWIR2/NIR + 2.0824$
4	$OM = -0.55 * B2 - 1.6382 * B4 - 2.2871 * NDVI - 0.0003 * TSAVI - 8.4739 * SWIR2/NIR + 2.0848$
5	$OM = -2.6756 * B4 - 1.7894 * NDVI - 0.0005 * TSAVI - 0.8289 * SWIR2/NIR + 1.7729$
6	$OM = 1.0724 * B2 - 2.6756 * B4 - 1.7894 * NDVI - 0.0005 * TSAVI - 0.8289 * SWIR2/NIR + 1.0633$
7	$OM = 0.7837 * B2 - 2.6756 * B4 - 1.7894 * NDVI - 0.0005 * TSAVI - 0.8289 * SWIR2/NIR + 1.2582$
8	$OM = -0.6521 * B2 - 0.2912 * B4 - 0.4722 * NDVI - 4.6662 * SWIR2/NIR + 1.3263$
9	$OM = 1.4732 * B2 - 0.2912 * B4 - 0.4722 * NDVI - 0.0002 * TSAVI - 16.3486 * SWIR2/NIR + 0.6387$
10	$OM = 1.4732 * B2 - 0.2912 * B4 - 0.4722 * NDVI - 0.0002 * TSAVI - 14.2974 * SWIR2/NIR + 0.4545$
11	$OM = 1.4732 * B2 - 0.2912 * B4 - 0.4722 * NDVI - 0.0002 * TSAVI - 14.2974 * SWIR2/NIR + 0.4594$
12	$OM = -0.8623 * B2 - 0.3192 * B4 - 0.3327 * NDVI - 0.0001 * TSAVI + 1.2287$
13	$OM = -1.5045 * B2 - 0.3192 * B4 - 0.3327 * NDVI - 0.0001 * TSAVI + 1.8298$
14	$OM = -1.3287 * B2 - 0.3192 * B4 - 2.2183 * NDVI - 0.0001 * TSAVI + 1.2296$
15	$OM = -1.3823 * B2 - 0.3192 * B4 - 1.7286 * NDVI - 0.0001 * TSAVI + 1.3435$



شکل ۱۰. همبستگی درصد ماده آلی اندازه‌گیری و محاسبه‌شده، با استفاده از داده‌های مدل درختی M5

اختلاف بین درصد ماده آلی خاک در اراضی بایر و زیرکشت سنتی بسیار اندک بوده (۰/۰۳٪) و این مسئله به غیرمعنی‌دار شدن این اختلاف، از جنبه آماری، در سطح ۵٪ منجر شده است. پدیده یادشده تأثیر ناچیز مدیریت سنتی و به‌زیرکشت‌بردن موقتی و کوتاه‌مدت اراضی را در مقدار ماده آلی خاک نشان می‌دهد. دلایلی مانند درجه حرارت بسیار بالای هوا و خاک، وجود سفره آب زیرزمینی کم‌عمق و شور طی فصل‌های گرم، شخم‌زدن هر ساله زمین‌ها و فعالیت ریزجانداران، در نهایت، به افزایش سرعت تجزیه ماده آلی و کاهش بسیار شدید آن در خاک سراسر منطقه انجامیده است؛ بدین ترتیب اراضی کشت‌و‌صنعت که حدود پانزده سال زیرکشت متمرکز نیشکر بوده است و از روش‌های کشاورزی روزآمد بهره می‌برد نیز، به‌طور میانگین، دارای ۱/۰۳٪ ماده آلی است. این پدیده فرایند بسیار پیچیده و زمان‌بر افزایش، هرچند اندک، مقادیر ماده آلی در اراضی مناطق گرم‌و‌خشک را بیان می‌کند. با استفاده از نتایج این پژوهش، می‌توان مقدار ماده آلی خاک را در اراضی منطقه جنوب‌غرب استان خوزستان، با تخمین حدود ۴۰ تا ۷۰٪، تعیین کرد. این درصد تخمین، درمورد شرایط جوّی گرم‌و‌خشک و زمین‌های اغلب فقیر از لحاظ ماده آلی و دارای پوشش ضعیف و تنک گیاهی، بسیار مطلوب است. به‌منظور بررسی بیشتر نتایج، از مدل آماری PLSR استفاده شد؛ داده‌های به‌دست‌آمده درمورد ماده آلی و شاخص‌های محاسبه‌شده و باندهای ماهواره‌ای متناظر با نقاط مورد بررسی وارد برنامه آماری آن‌اسکرملر شد و مدل PLSR به اجرا درآمد. نتایج این فرایند نشان داد که میانگین نتایج اعتبارسنجی و واسنجی بین ماده آلی و شاخص‌ها و باندهای ماهواره به‌ترتیب ۴۳/۴۸ و ۳۹/۰۸٪ است. نتایج حاصل از مدل PLSR بار دیگر نتایج همبستگی پیرسون و پلی‌نومیال به‌دست‌آمده را تأیید کرد. در ادامه، به‌منظور نمایش مکانی مقادیر ماده آلی خاک و نیز تعیین همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده، از روش کریجینگ استفاده

بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های محاسباتی، روش‌های آماری و نیز مدل درختی M5 نشان می‌دهد که مدل درختی M5 در مقایسه با دیگر فرایندهای مورد مطالعه در این پژوهش، به‌علت داشتن ضریب همبستگی بیشتر و RMSE تقریباً مشابه دیگر روش‌ها، قابلیت بیشتری در برآورد مقادیر ماده آلی خاک منطقه جنوب‌غرب استان خوزستان دارد (جدول ۷).

جدول ۷. نتایج مقادیر برازش و RMSE بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده ماده آلی خاک، با روش‌های متفاوت آماری

روش آماری	R2	RMSE
روش PLSR	۴۳/۴۸	۰/۱۲
روش کریجینگ	۴۳/۸۰	۰/۱۶
M5 مدل درختی	۶۷/۱۸	۰/۱۷

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، قابلیت تخمین مقادیر مواد آلی خاک با استفاده از باندهای سنجنده OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های به‌دست‌آمده از آنها، در منطقه جنوب‌غرب خوزستان، بررسی شد. سه نوع کاربری موجود در منطقه شامل اراضی کشت‌و‌صنعت، کشاورزی سنتی و اراضی بایر، در مجموع به‌مساحت ۷۸۴۸۰ هکتار، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش مشخص کرد که همبستگی بین مقدار ماده آلی خاک و شاخص‌ها و باندهای تصاویر ماهواره لندست ۸، در هر کاربری، متفاوت است و با افزایش مقدار ماده آلی در خاک سطحی، شاهد افزایش ضریب همبستگی بین شاخص‌ها و باندهای مورد مطالعه و ماده آلی خاک هستیم. این امر، در سایر مطالعاتی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت گرفته است نیز، دیده می‌شود (Benni & Amal, 2010; Rahmati et al., 2016; Jiang et al., 2016)؛ به‌گونه‌ای که علت این فرایند را اغلب افزایش بازتابش سطحی خاک بر اثر کاهش تراکم پوشش گیاهی، کاهش مقدار ماده آلی خاک، کاهش رطوبت خاک و همچنین ایجاد و گسترش لکه‌ها و پوسته‌های نمکی در سطح خاک می‌دانند.

- Particulate Organic Matter, Carbohydrate, Humic Acid Contents in Soil Macro-and Microaggregates as Affected by Cultivation**, *Geoderma*, 136, PP. 660-65.
- Cambou, A., Rémi, C., Ernest, K., Manon, V., Céline, D. & Bernard, G.B., 2016, **Prediction of Soil Organic Carbon Stock Using Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy (VNIRS) in the Field**, *Geoderma*, 261, PP. 151-59.
- Chen, L., ZHOU, S., Wu, S., Zhu, Q. & Dang, Q., 2014, **Spectral Response of Different Eroded Soils in Subtropical China: A Case Study in Changting County, China**, *China Journal of Mountain Science*, 11, PP. 132-149.
- Christensen, B., 2001, **Physical Fractionation of Soil and Structural and Functional Complexity in Organic Matter Turnover**, *European Journal of Soil Science*, 52, PP. 345-353.
- Ghorbani, Kh., Sohrabian E., and Salarijazi M., 2016. **Evaluation Of Hydrological And Data Mining Models In Monthly River Discharge Simulation And Prediction (Case Study: Araz-Kouseh Watershed)**, *Journal of water and soil conservation (Journal of agricultural sciences and natural resources)*, 23 (1); 203-217.
- Guo, Z., Kabindra, A., Menaka, C., Mette, B.G., Phillip, R.O. & Mogens, H.G., 2019, **Selection of Terrain Attributes and Its Scale Dependency on Soil Organic Carbon Prediction**, *Geoderma*, 340, PP. 303-12.
- Jiang, Q., Yiyun, C., Long, G., Teng, F. & Kun, Q., 2016, **Estimating Soil Organic Carbon of Cropland Soil at Different Levels of Soil Moisture Using VIS-NIR Spectroscopy**, *Remote Sensing*, 8, P. 755.
- Katsuhisa, N., Yokobori, J., Hongo, C. & Nagata, O., 2011, **Estimating Soil Carbon Stocks in an Upland Area of Tokachi District, Hokkaido, Japan, by Satellite Remote Sensing**, *Soil Science and Plant Nutrition*, 57, PP. 283-93.
- شد. نتایج حاصل از روش کریجینگ نشان داد که همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده برابر با  $0.43/0.80$  بوده و داده‌ها دارای ضریب RMSE برابر با  $0.160$  بوده است که با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، منطقی به نظر می‌رسد. در ادامه، به‌منظور بررسی بیشتر، از مدل درختی M5 استفاده شد. طبق نتایج این مدل، همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده برابر با  $0.67/0.18$  و داده‌ها دارای ضریب RMSE برابر با  $0.173$  بودند. همان‌گونه که مشخص است، نتایج به‌دست‌آمده از مدل درختی M5 توانسته است بهتر از سایر روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش، بین داده‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده همبستگی برقرار کند. این فرایند، با توجه به ماهیت مدل M5 و همچنین استفاده از روابط ریاضی متعدد، طبیعی است. در نهایت، داده‌های به‌دست‌آمده از شاخص‌های محاسباتی، روش‌های آماری و مدل M5 نشان می‌دهد مدل درختی M5 که ضریب R2 بیشتر و RMSE تقریباً برابر با دیگر فرایندها دارد، در قیاس با سایر روش‌های مورد مطالعه در این پژوهش، قابلیت بیشتری در برآورد مقادیر ماده آلی خاک در منطقه جنوب‌غرب استان خوزستان دارد.

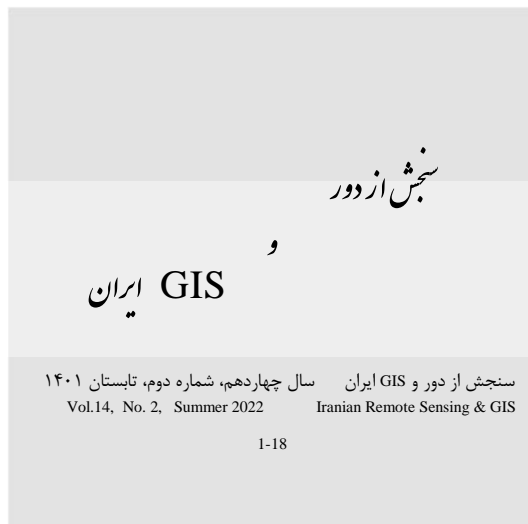
##### ۵- منابع

- Agbu, P.A., Donald, J., Fehrenbacher, I. & Jansen, J., 1990, **Soil Property Relationships with SPOT Satellite Digital Data in East Central Illinois**, *Soil Science Society of America Journal*, 54, PP. 807-12.
- Bajwa, S.G. & Tian, F., 2005, **Soil Fertility Characterization in Agricultural Fields Using Hyperspectral Remote Sensing**, *Transactions of the ASAE*, 48, PP. 2399-2406.
- Benni, T. & Amal, A., 2010, **Monitoring and Evaluation of Soil Salinity in Term of Spectral Response Using Landsat Images and GIS in Mesopotamian Plain/Iraq**, *Iraqi Journal of Desert Studies*, 2, PP. 19-32.
- Bongiovanni, M.D. & Lobartini, J.C., 2006,



- Khayamim, F., Khademi, H., Stenberg, B. & Wetterlind, J., 2015, **Capability of Vis-NIR Spectroscopy to Predict Selected Chemical Soil Properties in Isfahan Province**, JWSS-Isfahan University of Technology, 19:, PP. 81-92.
- Lal, R., 1997, **Degradation and Resilience of Soils**, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences, 352., PP. 997-1010.
- Liu, Y., Qinghu, J., Teng, F., Junjie, W., Tiezhu, S., Kai, G., Xiran, L. & Yiyun, C., 2014, **Transferability of a Visible and Near-Infrared Model for Soil Organic Matter Estimation in Riparian Landscapes**, Remote Sensing, 6, PP. 4305-22.
- Lohani, A.K., Rakesh, K. & Singh, R.D., 2012, **Hydrological time Series Modeling: A Comparison between Adaptive Neuro-Fuzzy, Neural Network and Autoregressive Techniques**, Journal of Hydrology, 442, PP. 23-35.
- López, F., Montserrat, J., José M. & Luis, G., 2005, **Using geostatistical and Remote Sensing Approaches for Mapping Soil Properties**, European Journal of Agronomy, 3, PP. 279-289.
- Lorenz, K., Lal, R. & Shipitalo, M.J., 2008, **Chemical Stabilization of Organic Carbon Pools in Particle Size Fractions in no-till and Meadow Soils**, Biology and Fertility of Soils, 44, PP. 1043-51.
- Mahmoudzadeh, H., Matinfar, H.R., Taghizadeh-Mehrjardi, R. & Kerry, R., 2020, **Spatial Prediction of Soil Organic Carbon Using Machine Learning Techniques in Western Iran**, Geoderma Regional, 21, PP. 243-260.
- McDowell, M., Gregory, L., Bruland, L., Jonathan, L., Deenik, S. & Nichola, M., 2012, **Soil Total Carbon Analysis in Hawaiian Soils with Visible, Near-Infrared and Mid-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy**, Geoderma, 189, PP. 312-320.
- Mehrabi Gohari, E., Matinfar H. R., Jafari, A., Taghizadeh Mehrjardi, A., and Khayamim, F., 2020. **Comparing Different Statistical Models And Pre-Processing Techniques For Estimation Several Chemical Properties Of The Soil Using Vnir/Swir Spectrum**, Remote Sensing & GIS, 11, (4): 47-60.
- Minasny, B., Alfred, E. & Hartemink, E., 2011, **Predicting Soil Properties in the Tropics**, Earth-Science Reviews, 106, PP. 52-62.
- Mulder, V.L., Bruin, S., Michael, E., Schaepman, F. & Mayr, T.R., 2011, **The Use of Remote Sensing in Soil and Terrain Mapping—A Review**, Geoderma, 162, PP. 1-19.
- Niwa, K., Yokobori, J., Hongo, C. & Nagata, O., 2011, **Estimating Soil Carbon Stocks in an Upland Area of Tokachi District, Hokkaido, Japan, by Satellite Remote Sensing**, Soil Science and Plant Nutrition, 57, PP. 283-293.
- Quinlan, J., 1992, **Learning with Continuous Classes**, In 'AI'92: Proceedings of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, PP. 343-348, In: World Scientific: Singapore.
- Rahmati, M., Neyshabouri, M.R., Mohammady Oskouei, M., Fard, A.F. & Ahmadi, A., 2016, **Soil organic Carbon Prediction Using Remotely Sensed Data at Lighvan Watershed, Northwest of Iran**, Azarian Journal of Agriculture, 3, PP. 45-49.
- Senthilkumar, S., Kravchenko, A.N. & Robertson, G.P., 2009, **Topography Influences Management System Effects on Total Soil Carbon and Nitrogen**, Soil Science Society of America Journal, 73, PP. 2059-67.
- Simbahan, C., Dobermann, A., Goovaerts, P., Ping, J. & Haddix, M., 2006, **Fine-Resolution Mapping of Soil Organic Carbon Based on Multivariate Secondary Data**, Geoderma, 132, PP. 486-497.
- Thaler, A., Larsen, I. & Yu, Q., 2019, **A New Index for Remote Sensing of Soil Organic Carbon Based Solely on Visible Wavelengths**, Soil Science Society of America Journal, 83, PP. 1443-1450.

- Vasques, G.M., Grunwald, S., Comerford, N.B. & Sickman, J.O., 2010, **Regional Modelling of Soil Carbon at Multiple Depths within a Subtropical Watershed**, *Geoderma*, 156, PP. 326-336.
- Walkley, A. & Armstrong Black, I., 1934, **An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method**, *Soil Science*, 37, PP. 29-38.
- Wang, B., Waters, C., Orgill, S., Cowie, A., Clark, A., Liu, D., Simpson, M., McGowen, I. & Sides, T., 2018, **Estimating Soil Organic Carbon Stocks Using Different Modelling Techniques in the Semi-Arid Rangelands of Eastern Australia**, *Ecological Indicators*, 88, PP. 425-438.
- Wiesmeier, M., Barthold, F., Blank, B. & Kögel-Knabner, I., 2011, **Digital Mapping of Soil Organic Matter Stocks Using Random Forest Modeling in a Semi-Arid Steppe Ecosystem**, *Plant and Soil*, 340, PP. 7-24.
- Zahirnia, A., and Matinfar, H.R., 2019. **Determination of the Land Suitability of Sugarcane Fields Based on Soil Quality Index Using a Geographic Information System**, *Journal of water and soil science*, 23 (2) :173-188.
- Zahirnia, A., Matinfar, H. R., Bahrami, H., 2019, **Investigation of parameters affecting soil quality under saline and semi-saline conditions (Case study of south and southwest of Khuzestan province)**, *Journal of Agricultural Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz*, Volume 43, Number 3.



## Evaluation of Soil Organic Carbon Storage in Different Land Uses Using Partial Least Squares, Geostatistics, M5 Tree Model and Landsat 8 Statistical Methods

Zahirmia A.R.<sup>1</sup>, Matinfar H.R.<sup>2\*</sup>, Bahrami H.A.<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student of Soil Science, Agriculture Faculty, Lorestan University
2. Associate Prof. of Soil Science, Agriculture Faculty, Lorestan University
3. Associate Prof. of Soil Science, Agriculture Faculty, Tarbiat ModaRres University

### Abstract

Organic carbon plays a activate role in environmental sustainability, soil quality and health index, so identifying the spatial distribution of carbon sequestration is a requirement of environmental planning and soil management. The purpose of this study is to investigate the amount of carbon sequestration in sugarcane and traditional uses of sugarcane, traditional agriculture and barren. In each land use, 60 soil samples were taken and organic carbon, salinity, lime, soil reaction and solution sodium were measured. Using Landsat 8 satellite OLI and TIRS spectral data, the variable of soil and vegetation indices including: NDVI, SAVI, TSAVI, OSAVI, MSAVI, SOCI, WdVI, PVI, RVI and BI in the sample points was obtained and the relationship between them and the amount of soil organic matter was calculated. The results show that in agro-industrial use, SOCI index with 50.30% and band 3 with 53.82% have the highest correlation, in traditional agriculture, PVI index with a correlation of 60.35% and band 7 with 60.63% and in Barren lands ,RVI index with a correlation of 34.27% and band 2 with 36.67% have the highest correlation with the amount of soil organic matter. The results of statistical analysis by partial least squares fitting method showed that the average of calibration and validation results are 43.48 and 39.08%, respectively. The results of estimating soil organic matter by kriging method and M5 tree model show that the correlation between measured and predicted organic matter was 66.20% and 82.00%, respectively. The results show that there is a significant correlation between soil organic matter and Landsat 8 satellite indices and bands, and it is possible to estimate the soil organic matter levels of the study area and other areas with similar conditions with acceptable probability.

**Keywords:** Soil organic matter, Southwest Khuzestan, PLSR statistical method, Kriging method, M5 tree model.

\* Correspondence Address: Soil Science Dep., University of Lorestan. Tel: 09123450969  
Email: Matinfar.h@lu.ac.ir