

بررسی تأثیر اجزای بافت خاک و میانگین هندسی قطر ذره‌ها روی پاسخ طیفی سطح خاک (مطالعه‌ی موردی: بخشی از کویر خاتم، یزد)

زهره ابراهیمی خوسفی* - دانشجوی دکترای بیابان‌زدایی، دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
عباسعلی ولی - استادیار دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
رضا قضاوی - استادیار دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان
حامد حق پرست - دکترای محیط زیست، دانشگاه پونا، هند

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۹/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۱۲/۱۸

چکیده

امروزه با پیدایش فناوری سنجش از دور، امکان بهره‌برداری از آن برای مطالعه‌ی بسیاری از ویژگی‌های خاک، همچون اندازه‌ی هندسی ذره‌ها و تعیین بافت خاک با صرف وقت و هزینه‌ی کمتری فراهم شده است. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر اجزای بافت خاک و میانگین هندسی ذره‌ها بر پاسخ طیفی سطح خاک، در دشت خاتم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده ASTER است. بدین منظور در ۲۳ آگوست سال ۲۰۰۷ میلادی، مطابق با زمان اخذ تصویر، نمونه‌برداری از سطح خاک در ۷۶ پروفیل به شکل تصادفی انجام گرفت. مقادیر مربوط به بافت نمونه‌های خاک به روش هیدرومتری در آزمایشگاه و در نهایت میانگین هندسی قطر ذره‌ها برای هر نمونه محاسبه شد. پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک و سایر پردازش‌ها روی تصاویر، برای بررسی اثر بافت و میانگین هندسی ذره‌های خاک بر بازتاب زمینی، از روش رگرسیون چندمتغیره بین مقادیر تخمینی هر لایه‌ی اطلاعاتی و مقادیر آزمایشگاهی در نقاط آموزشی استفاده شد. در نهایت دقت مدل‌ها بر اساس ضریب تبیین حاصل از برازش خط بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی نقاط تست مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که باند مادون قرمز نزدیک سنجنده‌ی استر، می‌تواند در تعیین درصد شن (با ضریب تبیین ۰/۵ و خطای استاندارد ۱۱/۹)، سیلت (با ضریب تبیین ۰/۴ و خطای استاندارد ۱۰/۰۹)، رس (با ضریب تبیین ۰/۵۷ و خطای استاندارد ۳/۴۶) و میانگین هندسی ذره‌های خاک (با ضریب تبیین ۰/۴ و خطای استاندارد ۰/۰۹) منطقه‌ی مطالعاتی مؤثر باشد. همچنین نتایج نشان داد که ارتباط معناداری بین مقادیر بازتاب طیفی سایر باندهای اصلی و فاصله‌ی اقلیدسی از خط خاک با مقادیر آزمایشگاهی سیلت، شن و میانگین هندسی ذره‌ها وجود ندارد.

کلیدواژه‌ها: بافت خاک، میانگین هندسی قطر ذره‌ها، پاسخ طیفی، رگرسیون، مدل.

مقدمه

بافت از خصوصیت‌های مهم خاک است که از نظر مکانی متغیر و از نظر زمانی تا حدی پایدار بوده و بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر دارد. بافت خاک از جنبه‌های مختلف اهمیت بسیاری دارد (Folk, 1966; Means and Parcher, 1964; Soil Survey Staff, 1999) و اهمیت آن از نظر علوم مهندسی، کشاورزی و محیط زیست به‌اثبات رسیده است (بای بوردی، ۱۳۷۹). استفاده از فناوری دورسنجی در مطالعات خاک، به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی متغیر و به‌هنگام بودن تصاویر، چند طیفی بودن و پوشش وسیع اطلاعات، بسیار مفید و مؤثر است (Lopez et al., 2005). میزان رطوبت، بافت و ساختمان خاک، بسیار پیچیده و وابسته به یکدیگر است. رطوبت خاک موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و مادون قرمز می‌شود. در خاک خشک فضای بین ذره‌ها با هوا اشغال می‌شود، با افزایش رطوبت خاک، آب جای هوا را اشغال می‌کند و بازتاب خاک کاهش می‌یابد. با توجه به مقایسه‌ی نوع خاک، رابطه بین خاک، ساختمان و رطوبت خاک را بهتر می‌توان بیان کرد. خاک رسی که مقدار زیادی رطوبت در خود نگه می‌دارد، بازتاب کمتری دارد. هنگامی که خاک مرطوب باشد، در واقع هر ذره‌ای از خاک با لایه‌ای از آب احاطه شده است. بنابراین خاک‌هایی که ذره‌های ریزتر دارند، در واحد حجم نیز سطح بیشتری دارند؛ زیرا هر چه بافت خاک ریزتر باشد، سطح کل ذره‌ها بیشتر می‌شود، در نتیجه آب زیادتری را در خود نگه می‌دارد. بافت خاک (نسبت شن، سیلت و رس) عامل بسیار مهم و تعیین کننده‌ای در میزان رطوبت خاک است. خاک‌های درشت‌بافت، مانند خاک‌های شنی به‌راحتی زهکش می‌شوند و در نتیجه رطوبت کمی در خود نگه می‌دارند و موجب افزایش بازتاب طیفی می‌شوند. خاک‌های ریزبافت، همچون خاک‌های رسی و سیلتی رسی، دارای زهکش ضعیف هستند، در نتیجه بازتاب طیفی کمتری دارند. ساختمان خاک نیز نقش مهمی در بازتاب طیفی دارد. دانه‌بندی ریزتر، حجم خاک را بیشتر پر می‌کند و به سطح صاف خاک منجر می‌شود، در حالی که دانه‌بندی درشت با اشکال نامنظم، سطح ناهموار ایجاد می‌کند و فضاهای خالی بین دانه‌بندی‌ها، حالت نامنظم به خاک می‌دهند. بنابراین خاک‌های بدون ساختمان نسبت به خاک‌های دارای ساختمان، بازتاب بیشتری دارند.

طی مطالعه‌ای که دانش و همکاران (۱۳۸۷) انجام دادند، تأثیر اجزای بافت خاک را در داده‌های دورسنجی شده و شرایط طبیعی مشخص و مقادیر رس در خاک سطحی با ضریب تبیین ۰/۷۲ برآورد کردند. همچنین دانش و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که میانگین هندسی ذره‌های خاک دارای اثر بارزی بر اطلاعات دورسنجی شده از سطح خاک است. در مطالعه‌ای برای برآورد بافت خاک بر اساس تصاویر ابرطیفی، اهمیت باندهای مادون قرمز میانی (SWIR) برای تخمین رس، سیلت و شن نشان داده شد (Casa, et al., 2013). فنگ و همکاران (۲۰۱۲) از تصاویر سنجنده‌ی مادیس برای تهیه‌ی نقشه‌ی بافت خاک استفاده کردند. در پژوهشی دیگر از روش‌های کریجینگ و رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های خاک (رس، کربن و قلیائیت) استفاده شد و نتایج آن نشان داد که روش کریجینگ همیشه توانایی پیش‌بینی بهتر ویژگی‌های خاک را ندارد. (Wei Sun, et al., 2012). در بررسی ارتباط بین ویژگی‌های خاک زمین‌های متروکه و داده‌های سنجنده‌ی ASTER^۱ با استفاده از روش رگرسیون خطی چندگانه، نشان داده شد که

فقط، ظرفیت تبدلی خاک ارتباط معناداری با داده‌های سنجنده مذکور دارد. (Piekarczyk et al., 2012). نبی‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) کارایی هشت مدل ریاضی (فردلاند، گمپرتز، جیکی، لگاریتمی، نمایی، لگاریتمی - نمایی و فراکتال) را در توصیف اندازه‌ی ذره‌های خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از بهینه‌بودن مدل فردلاند برای توصیف اندازه‌ی ذره‌های خاک در کلاس‌های بافت لوم سیلتی، لوم رس سیلتی، رس سیلتی و لوم شنی است. همچنین آنها نشان دادند که برازش سه مدل فراکتال، نمایی و لگاریتمی - نمایی با افزایش مقدار شن افزایش می‌یابد و رابطه‌ی معکوسی بین برازش مدل فراکتالی با مقدار سیلت نمونه‌های خاک وجود دارد. بنابراین گمان می‌رود که برازش مدل‌ها تا اندازه‌ای به درصد اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس) بستگی داشته باشد (Hwang, et al., 2002; Hwang, 2004).

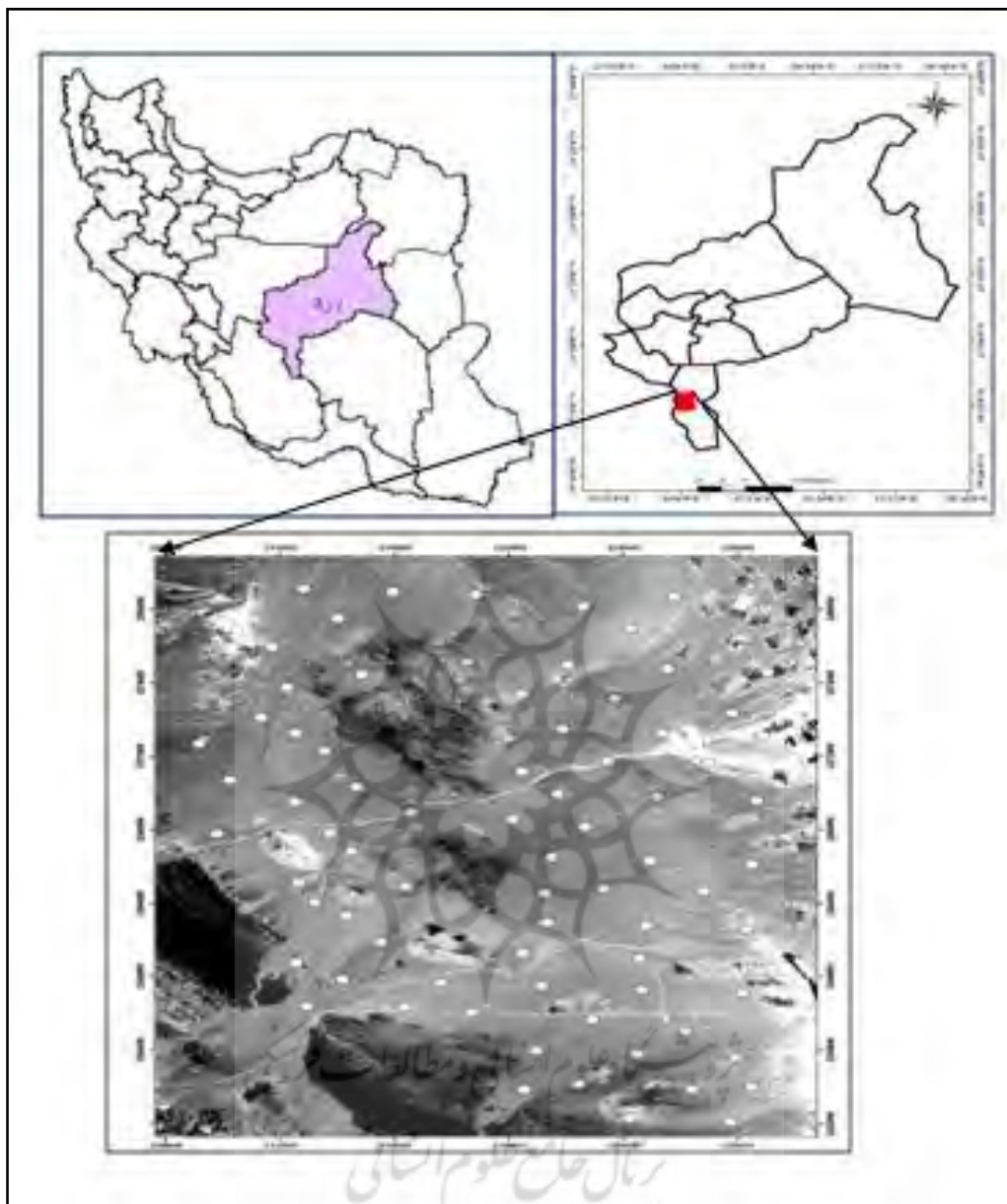
خانامانی و همکاران (۱۳۹۰) برای ارزیابی وضعیت خاک دشت سگری اصفهان از فناوری سنجنش از دور و روش کریجینگ استفاده کردند. تجزیه و تحلیل آماری پژوهش آنها نشان داد که همبستگی معناداری بین شاخص خاک و اطلاعات طیفی سبز و قرمز و شاخص درخشندگی وجود دارد و در نتیجه امکان تهیه‌ی نقشه‌ی شاخص خاک به کمک این باندها وجود دارد. شیرازی و همکاران (۱۳۸۹) با مقایسه‌ی اطلاعات باندهای سنجنده‌های ASTER و LISS-III به طبقه‌بندی خاک منطقه‌ی پلایای دامغان پرداختند. نتایج مطالعه‌ی آنها نشان داد که از ترکیب باندهای سبز و قرمز و مادون قرمز میانی سنجنده‌ی LISS-III به همراه باندهای سبز و مادون قرمز ASTER به بیشترین اطلاعات دست یافت. همچنین نتایج تحقیق آنها نشان داد که از ترکیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک و میانی سنجنده‌ی LISS-III با کلیه‌ی باندهای ASTER بیشترین اطلاعات به دست می‌آید که می‌توان با استفاده از ترکیب باندهای مذکور، خاک این مناطق را دقیق‌تر طبقه‌بندی کرد.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد، تا کنون مطالعه‌ی (به‌ویژه در ایران) انجام نشده است که بر اساس داده‌های چندطیفی سنجنده‌ی استر، به بررسی اثر میانگین هندسی ذره‌ها و بافت خاک روی پاسخ طیفی خاک پرداخته شده باشد. بنابراین در این مطالعه تلاش شده است که رابطه بین میانگین هندسی قطر ذره‌ها و اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس) با داده‌های انعکاس زمینی سنجنده‌ی مذکور که دارای تنوع باندی قابل توجهی نیز است مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، دشت خاتم واقع در استان یزد، در گستره‌ی طول جغرافیایی $23^{\circ} 5' 54''$ تا $52^{\circ} 18' 54''$ شرقی و عرض جغرافیایی $28^{\circ} 21' 30''$ تا $30^{\circ} 33' 30''$ شمالی واقع شده است (شکل شماره‌ی ۱). این محدوده وسعتی برابر با $713/5$ کیلومتر مربع از استان یزد را پوشش می‌دهد. میانگین بارندگی ۱۵ ساله در منطقه‌ی مطالعاتی ۹۸ میلی‌متر، میانگین دمای سالانه $18/3$ درجه‌ی سانتی‌گراد و اقلیم محدوده‌ی مورد مطالعه بر اساس روش دومارتن اصلاح شده، خشک سرد تا فراخشک سرد است.



شکل ۱. موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری در ایران و استان یزد

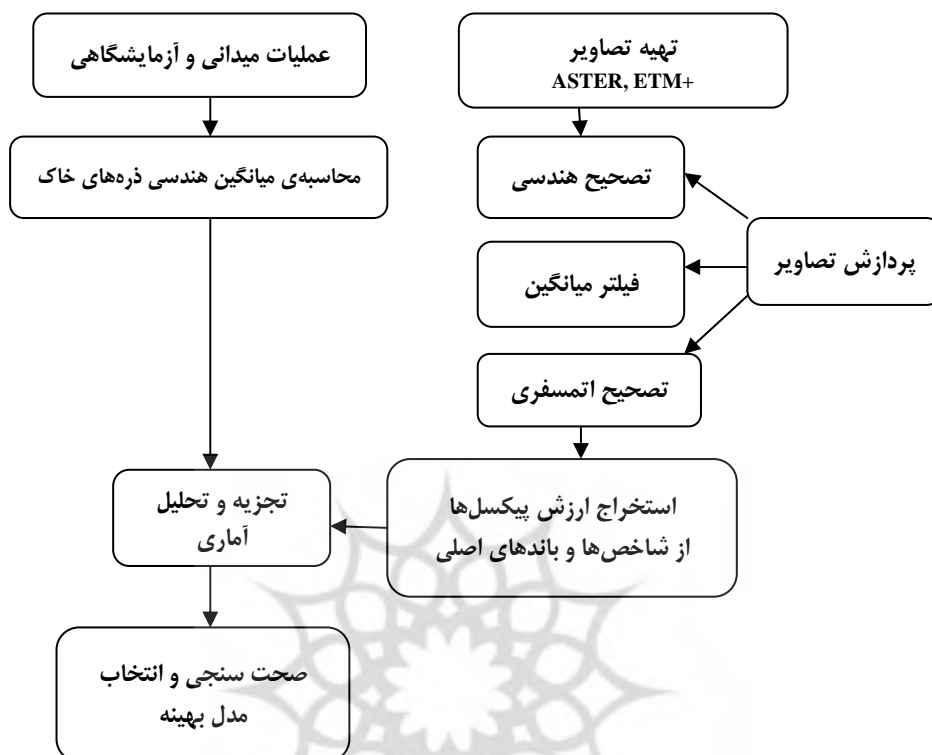
داده‌های پژوهش

داده‌های ماهواره‌ای: در پژوهش حاضر از تصاویر سنجنده‌ی استر ماهواره‌ی ترآ، در آگوست سال ۲۰۰۷ میلادی و تصاویر سنجنده‌ی ETM+ ماهواره‌ی لندست استفاده شده است.

داده‌های آزمایشگاهی: در این مطالعه از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های خاک برداشت شده در سال ۱۳۸۶ استفاده شده است. این داده‌ها مقدار شن، رس و سیلت را شامل می‌شوند.

نرم‌افزارها و وسایل مورد استفاده در پژوهش: برای انجام پردازش‌های تصویری از نرم‌افزار ENVI4.2، برای محاسبه‌ی ضرایب رگرسیون از نرم‌افزار SPSS16 و از گیرنده‌ی GPS به‌منظور برداشت میدانی استفاده شده است.

نمودار کلی روش کار در شکل شماره ۲ و شرح مربوط به آن، در ادامه ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار کلی روش پژوهش

عملیات میدانی و آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری اجزای بافت خاک (شن، رس، سیلت) در شهریور ۱۳۸۶ مطابق با زمان تصویربرداری، مراجعات صحرائی برای جمع‌آوری داده‌های صحرائی انجام گرفت. بدین منظور ۷۶ پروفیل به شکل تصادفی در سطح منطقه‌ی مطالعاتی انتخاب و حفر شد. نمونه‌های خاک پس از حمل به آزمایشگاه مورد تجزیه قرار گرفت و مقادیر مربوط به بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین شد (Soil Survey Staff, 1996).

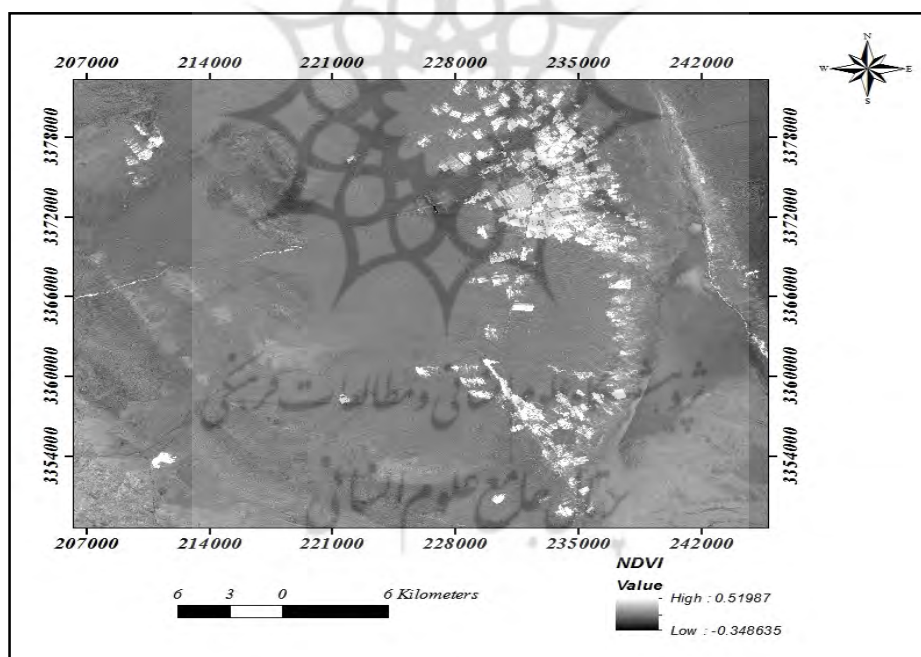
پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصحیح هندسی، فیلتر میانگین و تصحیح اتمسفری

برای تصحیح هندسی تصاویر از روش تصویر به تصویر استفاده شد. در مرحله‌ی بعد، تصاویر سنجنده‌ی استر به روش غیرپارامتری (تطابق هندسی تصویر به تصویر) تطابق هندسی شدند. در این مرحله تصویر زمین مرجع شده ETM+ به عنوان تصویر مرجع و تصویر استر به عنوان تصویر تابع، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که سنجنده‌ی ETM+ دارای باندهایی با قدرت تفکیک ۱۴/۲۵ و ۲۸/۵ متر و تصویر استر نیز دارای باندهایی با قدرت تفکیک زمینی ۱۵، ۳۰ و

۹۰ متر است، ابتدا تصاویر باندهای هر سنجنده با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.2 به‌طور جداگانه در یک پایگاه ذخیره شدند و همزمان با این عملیات، تمامی باندها به ابعاد سلول ۱۴/۲۵ متری، به‌روش نمونه‌برداری مجدد نزدیکترین همسایه تغییر داده شدند. سپس با انتخاب ۶۸ نقطه‌ی کنترل روی تصاویر مرجع و نقاط نظیر آن در تصاویر تابع، انتخاب معادله‌ی پلی‌نومیال درجه دو و روش نمونه‌برداری مجدد نزدیکترین همسایه، تصاویر استر با RMSE نقاط کنترل برابر با ۰/۴۵ تطابق هندسی شدند.

برای حذف خطای ناشی از GPS در برداشت میدانی، فیلتر میانگین سه در سه روی تصاویر اعمال شد. برای دستیابی به بازتاب واقعی زمینی و همچنین تصحیح اتمسفری تصاویر، از الگوریتم FLAASH استفاده شد. در نهایت محدوده‌ی مورد مطالعه از روی تصاویر برش داده شد. پس از تهیه‌ی تصویر از منطقه‌ی مطالعاتی و قرار دادن آنها در یک پایگاه اطلاعاتی، عملیات تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱، فاصله‌ی اقلیدسی از خط خاک^۲ و تعیین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۳ روی این تصویر انجام گرفت. شاخص NDVI برای تعیین پیکسل‌های با پوشش گیاهی بالا و عدم برداشت زمینی از این مناطق تهیه شد (شکل شماره ۳).



شکل ۳. شاخص پوشش گیاهی نرمال شده‌ی منطقه‌ی مطالعاتی

محاسبه‌ی میانگین هندسی ذره‌های خاک

برای محاسبه‌ی فاصله‌ی اقلیدسی از خط خاک (SLED) و تعیین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، از روابط شماره ۱ و ۲ استفاده شد (Fax and Sabbagh, 2002; Bannari et al., 1995).

1. Principal Component Analysis (PCA)
2. Soil Line Euclidean Distance (SLED)
3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

$$SLED = ((NIR - A)^2 + (R - B))^0.5 \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در روابط فوق، R و NIR به ترتیب بازتاب از سطح زمین در محدوده‌ی قرمز و مادون قرمز نزدیک، A و B به ترتیب مقادیر حداقل بازتاب طیفی در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند.

برخلاف بافت خاک که فقط بر اساس میانگین عددی قطر ذره‌ها و فراوانی آن است، با استفاده از روابط مثلث بافت شیرازی و بورسما می‌توان به اطلاعات مهمی در مورد قطر هندسی ذره‌ها و تحلیل مکانیکی بافت خاک و نیز همگون بودن خاک دست یافت (بای بوردی، ۱۳۷۹). برای بررسی اثر میانگین هندسی قطر ذره‌ها بر خصوصیت‌های طیفی خاک با استفاده از روابط مثلث بافت خاک شیرازی و بورسما، مقادیر شن، سیلت و رس در هر نمونه به مقادیر میانگین هندسی قطر ذره‌ها با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی ۳ تبدیل و محاسبه شد (Shirazi and Boersma, 1984).

$$d_g = \text{Expa} \quad a = 0.01 \sum_i^n f_i \ln M_i \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در این رابطه؛ d_g : میانگین هندسی قطر ذره‌های خاک؛ f_i : درصد فراوانی هر یک از اجزای بافت خاک (شن، سیلت، رس) و M_i : میانگین عددی قطر هر جزء است (این مقدار برای شن برابر با ۱/۰۲۵ میلی‌متر، برای سیلت برابر با ۰/۰۲۶ میلی‌متر و برای رس برابر با ۰/۰۰۱ میلی‌متر است).

استخراج ارزش پیکسل‌ها

پس از تلاقی نمونه‌های آموزشی (۵۶ نمونه) و شاهد (۲۱ نمونه) با ۱۴ باند اصلی سنجنده‌ی استر و تصاویر حاصل از شاخص‌های NDVI و SLED و لایه‌های اطلاعاتی حاصل از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مقادیر بازتاب طیفی هر نمونه به دست آمد.

تجزیه و تحلیل آماری و صحت‌سنجی

برای بررسی و مقایسه کردن مقادیر شن، سیلت و رس و میانگین هندسی قطر ذره‌ها با مقادیر بازتاب زمینی، از نمونه‌های آموزشی استفاده شد. سپس با استفاده از روش رگرسیون خطی چندمتغیره و با توجه به مقادیر ضریب تبیین تصحیح شده $(R^2 \text{adj})$ ، F و مقدار خطای استاندارد (S.E)، مدل‌ها اعتبارسنجی شدند. برای تعیین دقت مدل‌ها، آمار برداشت شده‌ی میدانی در ۲۱ نقطه‌ی شاهد و مقادیر تخمینی شن، سیلت و رس و میانگین هندسی قطر ذره‌ها در نقاط متناظر با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه با برازش خط مستقیم بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی در نقاط تست صورت گرفت و ضریب تبیین به دست آمده، به عنوان دقت مدل منتخب برای منطقه‌ی مطالعاتی منظور شد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۰).

یافته‌های پژوهش

متغیرهای آماری مربوط به نقاط نمونه‌برداری در جدول شماره ۱ و رابطه‌ی همبستگی بین مقادیر بازتاب طیفی با میانگین هندسی و اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس) در جدول ماتریس همبستگی (جدول شماره ۲) ارائه شده است.

جدول ۱. خلاصه‌ی ارزیابی متغیرهای آماری مقادیر آزمایشگاهی در منطقه‌ی مطالعاتی

ویژگی‌های خاک	متغیرهای آماری	شن	سیلت	رس
مقدار حداقل	۹	۲/۴	۳/۴	
مقدار حداکثر	۸۶/۲	۷۰/۷	۲۷/۱	
انحراف معیار	۱۵/۹	۱۲/۵۸	۴/۷۶	
ضریب تغییرات	۰/۲۵	۰/۵۶	۰/۳۷	

بر اساس جدول مذکور مقادیر بالای ضریب تغییرات بیانگر غیر همگون بودن ویژگی‌های خاک است (Fallah et al, 2013).

جدول ۲. میزان همبستگی میانگین هندسی قطر ذره‌ها و اجزای بافت خاک با باندهای اصلی و پردازش داده شده در منطقه‌ی مطالعاتی

ویژگی‌های خاک	باند	شن	سیلت	رس	میانگین هندسی ذره‌ها
b1	-۰/۳۴۷**	۰/۳۲۹*	۰/۳۵۶**	-۰/۳۰۸*	
b2	-۰/۳۱۸*	۰/۲۹۶*	۰/۳۳۰*	-۰/۲۸۶*	
b3	-۰/۷۱۱**	-۰/۶۳۴**	۰/۷۵۷**	-۰/۶۳۸**	
b4	-۰/۲۸۶**	۰/۲۸۹*	۰/۲۴۶*	-۰/۲۴۶*	
b5	-۰/۲۳۷*	۰/۲۷۵*	۰/۱۵۱	-۰/۱۷۷*	
b6	-۰/۲۰۹*	۰/۲۵۸*	۰/۱۰۳	-۰/۱۵۲*	
b7	-۰/۳۲۰*	۰/۳۵۷**	۰/۱۹۷	-۰/۲۱۰*	
b8	-۰/۴۲۸**	۰/۴۵۸**	۰/۲۷۸*	-۰/۲۷۵*	
b9	-۰/۱۶۶*	۰/۲۴۰*	۰/۰۱۶	-۰/۰۸۷*	
b10	-۰/۱۶۴*	۰/۱۱۳	۰/۲۵۱	-۰/۰۶۷*	
b11	-۰/۲۳۵*	۰/۱۹۶*	۰/۲۶۴*	-۰/۱۰۰*	
b12	-۰/۳۲۲*	۰/۲۶۷*	۰/۳۷۰**	-۰/۱۸۲*	
b13	-۰/۱۹۲*	۰/۱۴۶*	۰/۲۴۹*	-۰/۰۶۹*	
b14	-۰/۱۸۶*	۰/۱۳۶*	۰/۲۴۱*	-۰/۰۴۶*	
pc1	۰/۳۷۳**	-۰/۳۳۸*	-۰/۴۰۷**	۰/۳۱۶*	
pc2	-۰/۳۰۰*	۰/۲۱۶*	۰/۴۲۸**	-۰/۱۸۲*	
pc3	-۰/۱۵۳*	۰/۱۳۷*	۰/۱۷۷*	-۰/۱۴۶*	
SLED	-۰/۳۰۸*	۰/۲۸۲*	۰/۳۳۲*	-۰/۲۶۶*	

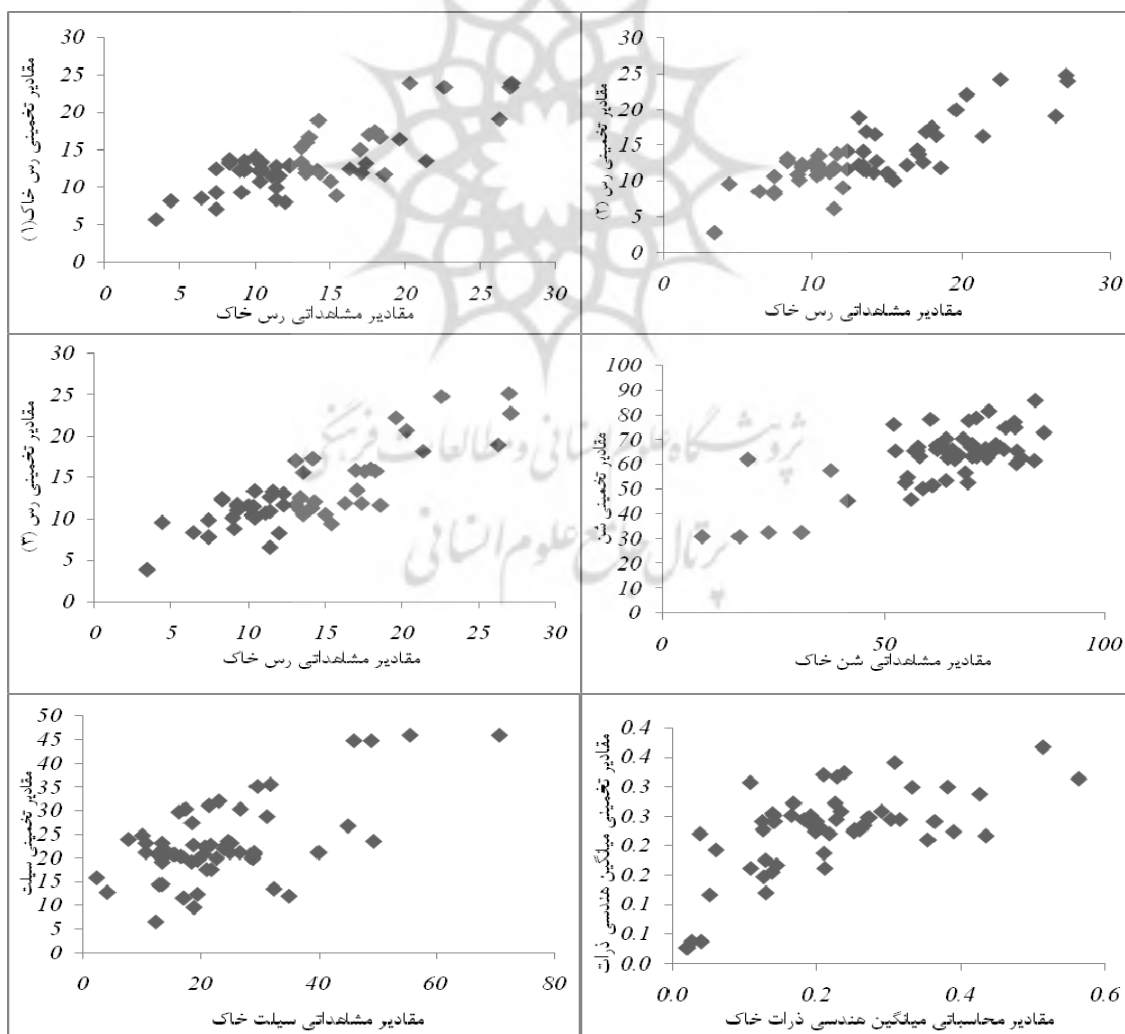
** همبستگی معنادار در سطح آماری ۱ درصد

* همبستگی معنادار در سطح آماری ۵ درصد

نتایج حاصل از برقراری رابطه‌ی رگرسیون خطی چند متغیره به‌روش گام‌به‌گام روی متغیرهای مستقل و وابسته در محل نقاط آموزشی، در جدول شماره‌ی ۳ و نمودار پراکندگی همبستگی مربوط به اطلاعات خاک اندازه‌گیری شده و تخمینی در محل نقاط مذکور، در شکل شماره‌ی ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. مدل‌های استخراج شده از تلاقی مقادیر شن، سیلت، رس و میانگین هندسی ذره‌های خاک با داده‌های پاسخ طیفی در ۵۶ نقطه‌ی آموزشی

معادله	شاخص خاک
$Clay_1 = 0.215b_3 - 8.345$ $Clay_2 = -4.6b_9 + 0.245b_3 + 1.58$ $Clay_3 = 4.5b_7 - 13.47b_9 + 0.21b_3 + 4.73$	Clay
$Silt = 0.463 b_3 - 23.5$	Silt
$Sand = -0.645 b_3 + 127.8$	Sand
$d_g = -0.004b_3 + 0.627$	dg



شکل ۴. نمودارهای پراکندگی همبستگی مربوط به اطلاعات خاک اندازه‌گیری شده و تخمینی در محل نقاط آموزشی برای منطقه‌ی مطالعاتی

بررسی جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که ذره‌های شن خاک دارای بیشترین ارتباط معنادار در سطح ۱ درصد آماری با باند ۳ در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که تمام رابطه‌های ذره‌های شن (در سطح ۱٪ و ۵٪ آماری) با مقادیر بازتاب طیفی از نوع معکوس است.

بیشترین ارتباط ذره‌های رس و سیلت خاک نیز با باندهای ۳ (محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک) و در سطح آماری ۱ درصد و نوع رابطه مستقیم است؛ یعنی با افزایش ذره‌های سیلت و رس خاک در حالت خشک، میزان بازتاب طیفی در باند ۳ افزایش و میزان جذب کاهش می‌یابد.

بیشترین میزان همبستگی میانگین هندسی ذره‌های خاک نیز همانند ذره‌های شن، در سطح ۱ درصد آماری فقط با باند ۳ و به صورت معکوس است.

این بدان معناست که با افزایش مقادیر شن و میانگین هندسی ذره‌های خاک، مقدار بازتاب کاهش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که افزایش این مقادیر، سبب افزایش زیری سطح خاک و افزایش جذب (کاهش بازتاب) در محدوده‌ی VNIR می‌شود. همچنین می‌توان این‌گونه برداشت کرد که در منطقه‌ی مطالعاتی، ذره‌های شن بیشترین تأثیر را در میانگین هندسی ذره‌های خاک منطقه‌ی مطالعاتی داشته‌اند.

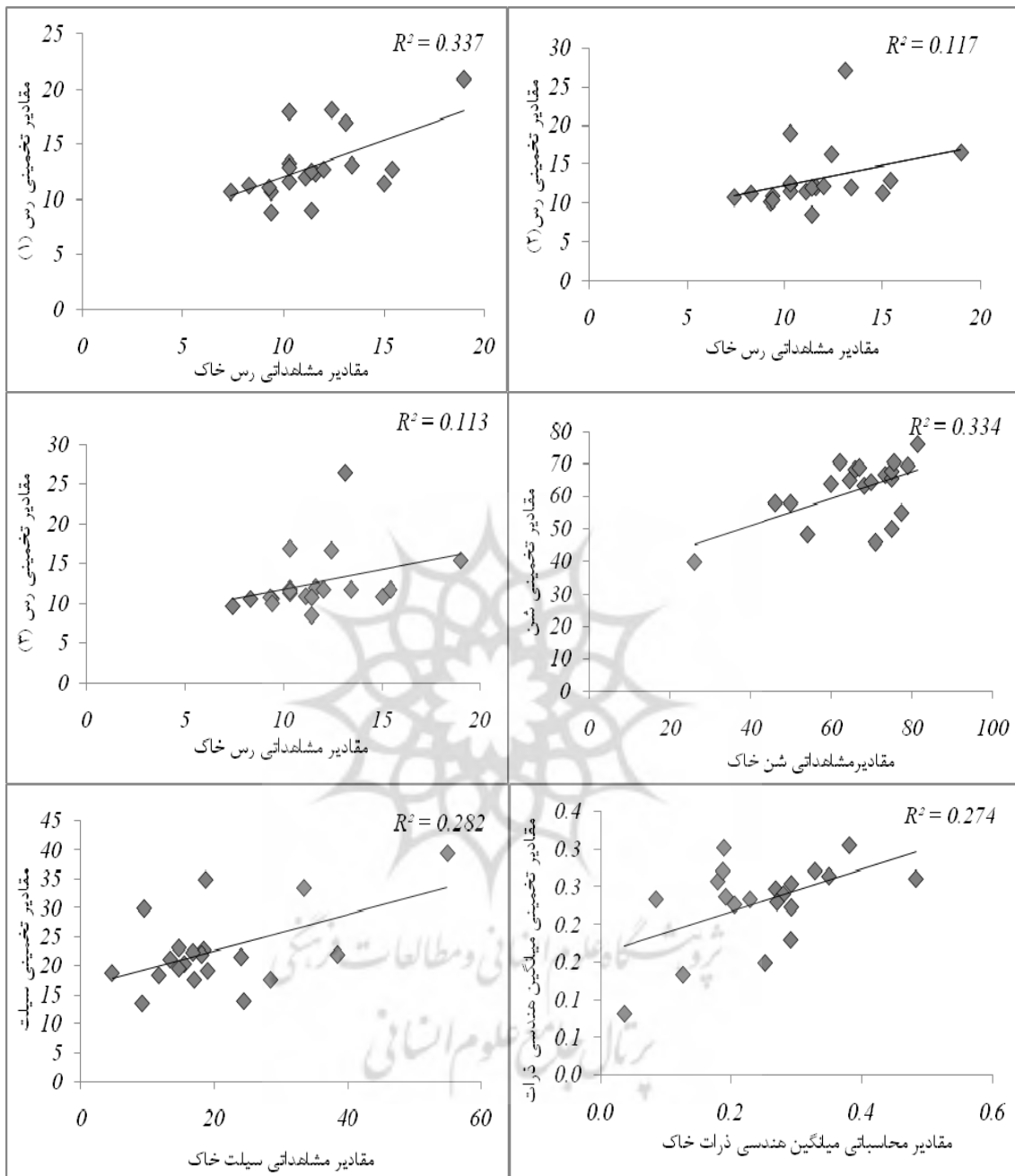
همچنین بررسی جدول شماره ۲ بیانگر آن است که ذره‌های شن، رس، سیلت و میانگین هندسی آنها، دارای ارتباط معنادار در سطح ۵ درصد آماری با فاصله‌ی اقلیدسی از خط خاک هستند. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت که باند مادون قرمز نزدیک (باند ۳) سنجنده‌ی استر، نقش به‌سزایی در بازتاب طیفی بر اساس بافت خاک در منطقه‌ی مطالعاتی دارد. از آنجاکه بالا بودن ضریب تبیین (R^2) در مدل انتخابی رگرسیون چندمتغیره، دلیل بر کارآمد بودن آن نیست و کارایی یک مدل وقتی به اثبات می‌رسد که بتواند توصیف خوبی از متغیر وابسته ارائه دهد (رضایی و سلطانی، ۱۳۷۷؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۱)، بنابراین مدل‌های استخراج شده بر اساس مقادیر بالاتر ضریب تبیین تصحیح شده و F و مقدار پایین‌تر خطای استاندارد (S.E) اعتبار سنجی شدند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌های مذکور در جدول شماره ۴ آمده است.

جدول ۴. نتایج ارزیابی مدل‌های استخراج شده

شاخص خاک	شماره‌ی مدل	ضریب تبیین	ضریب تبیین اصلاح شده	خطای استاندارد	F
Clay	۱	۰/۵۷۴	۰/۵۶۶	۳/۴۶	۷۲/۶
	۲	۰/۶۵۱	۰/۶۲۸	۳/۱۶	۴۹/۳۷
	۳	۰/۶۷۷	۰/۶۵۸	۳/۰۷	۳۹/۲۷
Silt	۱	۰/۴۰۱	۰/۳۹	۱۰/۰۹	۳۶/۲
Sand	۱	۰/۵۰۶	۰/۴۹۷	۱۱/۹	۵۵/۳
dg	۱	۰/۴۰۷	۰/۳۹۶	۰/۰۹	۳۷/۱۲

در نهایت نمودار مربوط به تعیین دقت مدل‌ها بر اساس مقادیر مشاهداتی نقاط شاهد و مقادیر برآورد شده توسط

مدل‌ها ترسیم شد (شکل شماره ۵).



شکل ۵. نمودار مربوط به تعیین دقت مدل‌ها بر اساس مقادیر مشاهداتی نقاط تست و مقادیر برآورد شده برای منطقه‌ی مطالعاتی

نتایج بررسی جدول شماره‌ی ۳، حاکی از نقش مؤثر باند مادون قرمز نزدیک (باند ۳) سنجنده‌ی استر در شناسایی اجزای بافت خاک (رس، سیلت، شن) و میانگین هندسی ذره‌های خاک است. گرچه بر اساس روابط رگرسیونی چندمتغیره، ارتباط معناداری بین مقادیر بازتاب طیفی سایر باندهای اصلی و فاصله‌ی اقلیدسی از خط خاک با مقادیر آزمایشگاهی سیلت، شن و dg برقرار نشده، اما مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رس در منطقه‌ی مطالعاتی نیز با ضریب تبیین نسبی بالا و خطای پایین با دو باند ۷ و ۹ در محدوده‌ی مادون قرمز میانی ارتباط معنادار دارد. آنچه حائز اهمیت است، انتخاب مدل بهینه از بین سه مدل مربوط به رس است. بر اساس معیارهای تعیین صحت مدل، گرچه مدل سوم مقدار ضریب F پایین‌تری دارد، اما

به دلیل بالاتر بودن مقادیر ضریب تبیین، ضریب تبیین اصلاح شده و پایین تر بودن خطای استاندارد، می‌تواند در مرحله اول به عنوان مدل بهینه انتخاب شود. اما بررسی جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که همبستگی معناداری بین مقادیر رس با دو باند ۷ و ۹ برقرار نشده است، بنابراین برای کسب اطمینان از مدل انتخابی به عنوان مدل بهینه، لازم است که دقت مدل‌ها بر اساس نقاط شاهد نیز بررسی شود. بررسی نمودارهای شکل شماره ۵ نشان می‌دهد که مقدار همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و تخمینی رس خاک نقاط شاهد در مدل اول، بهتر از دو مدل دیگر است. پس بر این اساس، انتخاب مدل سوم به عنوان مدل بهینه رد می‌شود و مدل اول به عنوان مدل مناسب‌تر برای تعیین بافت‌های سنگین در منطقه مطالعاتی معرفی می‌شود. دلیل این امر را می‌توان وارد شدن تعداد متغیرهای کمتر به مدل و کاهش اثر همبستگی متقابل بین متغیرهای مستقل دانست (معمدنیا و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین می‌توان این گونه برداشت کرد که اثر متقابل متغیرهای مستقل (باند ۳ و ۹) در مدل شماره ۲ و اثر متقابل متغیرهای مستقل (باند ۳، ۷ و ۹) در مدل شماره ۳، سبب افزایش ضریب تبیین در این مدل‌ها شده است. بنابراین در مطالعات مربوط به ویژگی‌های خاک، ارزیابی دقت مدل‌ها بر اساس نقاط شاهد، می‌تواند نقش به‌سزایی در انتخاب مدل بهینه داشته باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی با توجه به نتایج پژوهش انجام گرفته می‌توان گفت که باند مادون قرمز نزدیک داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌ی استر با ضریب تبیین بیشتر از ۰/۴۱ (مقدار همبستگی بیشتر از ۰/۶۴) و با خطای استاندارد کمتر از ۱۰/۹، می‌تواند در تعیین درصد شن، سیلت، رس و میانگین هندسی ذره‌های خاک در منطقه‌ی مطالعاتی مؤثر باشد. اما باندهای محدوده‌ی حرارتی این سنجنده، برای بارزسازی و شناسایی خاک‌های با بافت مختلف در محدوده مطالعاتی کارایی ندارد که دلیل این امر را می‌توان به پایین تر بودن قدرت تفکیک مکانی در این محدوده‌ی طیفی نسبت داد. از دیگر نتایج پژوهش حاضر، اینکه در مطالعات مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باید دو نکته‌ی اصلی در نظر گرفته شود: (۱) تفکیک نمونه‌های آموزشی و نمونه‌های شاهد (۲) ارزیابی نتایج بر اساس نمونه‌های شاهد؛ زیرا برای کسب اطمینان از مدل انتخاب شده به عنوان مدل بهینه، لازم است که دقت مدل‌ها بر اساس نقاط شاهد نیز بررسی شود و عدم توجه به این موضوع ممکن است سبب خطا در معرفی مدل بهینه در مناطق مطالعاتی شود. در نهایت طی این بررسی مشخص شد که در دشت خاتم، میانگین هندسی قطر ذره‌های خاک (dg) و ذره‌های شن، سیلت و رس، اثر چشمگیری بر بازتاب از سطح خاک دارند و به بیان دیگر، انعکاس طیفی از سطح خاک در این منطقه، حاوی اطلاعات مهمی در مورد این خصوصیت مهم فیزیکی خاک است و می‌توان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای دورسنجی شده به بررسی این ویژگی‌ها پرداخت.

منابع

- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A. R., 1995, **A Review of Vegetation Indices**, Remote Sensing Reviews (Journal of RS), Vol.13, PP. 95-120.
- Brady, N. and Weil, R., 2002, **The Nature and Properties of Soils**, 13th Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

- Bybord, M., 2001, **Soil Physics**, 6th Edition, Tehran University Publications, No. 1672, PP. 567-574.
- Casa, R., Palombo, A., and Pignatti, S, 2013, **A Comparison of Sensor Resolution and Calibration Strategies for Soil Texture Estimation from Hyperspectral Remote Sensing**, Geoderma, Vol.197-198, PP. 17-26.
- Danesh, M., Bahrami, H. A., Alavipanah, S.K., and Noroozi. A.A., 2010, **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., Vol. 12, PP. 479-494.
- Ebrahimi Khouf, Z., Mirakbari, M., Kalantari, S., Ebrahimi Khouf M., 2013, **Presentation of the Suitable Model for Determining of Fraction Vegetation in Arid Area Using of Satellite Data IRS-LissIII (Case Study: Sade Nahrein-Tabas)**, Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi), No. 94, PP. 55-62.
- Fallah, S.R., Zare, S. and Abtahi, S.A., 2013, **Oil Salinity Characteristics Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Images and Statistical Analysis**, Archives of Agronomy and Soil Science, Vol. 56, No.4, PP. 471-489.
- Feng, L., Fraster, W. and Waddle, A. 2012, **Soil Texture Mapping over Low Relief Areas Using Land Surface Feedback Dynamic Patterns Extracted from MODIS**, Geoderma, Vol.171-172, PP. 44-52.
- Folk, R. L., 1966, **A Review of Grain Size Parameters**, Sedimentology, Vol.6, PP.73-93.
- Fox, G. A. and Sabbagh, G. J., 2002, **Estimation of Soil Organic Matter from Red and Near-infrared Remotely Sensed Data Using a Soil Line Euclidean Distance Technique**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 66, PP. 1922-1928.
- Hwang, S. I., 2004, **Effect of Texture on the Performance of Soil Particle-size Distribution Models**, Geoderma, Vol. 123, PP. 363-371.
- Hwang, S. I., Lee, K. P., Lee, D. S. and Powers, S. E., 2002, **Models for Estimating Soil Particle-Size Distributions**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 66, PP. 1143-1150.
- Khanamani, A., Jafari, R., Sangooni, H., and Shahbazi, A., 2012, **Evaluation of Soil Status Using RS and GIS Technology (Case Study: Segzi Plain)**, Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science, Vol.2, No.3, PP. 25-37.
- Lopez-Granados, F., Jurado-Exposito, M., Pena-Barragan, J.M. and L. Garcia-Torres, 2005, **Using Geostatistical and Remote Sensing Approaches for Mapping Soil Properties**, European Journal of Agronomy, Vol.23, No. 3, PP. 279-289.
- Motamedniya, M., Sadeghi, S.R., Moradi, R. and Asadi, H., 2011, **Evaluation of Different Methods of Modeling for the Relations of Components of Rain, Science and Technology of Agriculture and Natural Resources**, Sciences of Soil and Water, No.52, PP. 27-36.
- Nabizade, A. and Beygi, H., 2012, **Performance of Mathematical Eight Model Describing Soil Particle Size in Some Soils of Chaharmahal Bakhtiyari Province, Science and Technology of Agriculture and Natural Resources**, Sciences of Soil and Water, No.57, PP. 63-75.

- Piekarczyk, J., Krolewicz, S. and Kazmierowski, C., 2012, **Relationships between Soil Properties of the Abandoned Fields and Spectral Data Derived from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)**, *Advances in Space Research*, Vol .49, No. 2, PP.280-291.
- Rezaei, A. and Soltani, A., 1999, **Introduction to Applied Regression Analysis**, Isfahan University Publishing, Isfahan.
- Shirazi, M., Matinfar, M., Nematollahi, M.J., and Zehtabiyani, G.R, 2011, **Comparison of Information Content of Aster and LISS-III Bands in Arid Areas (Case study: Damghan Playa)**, *Journal of Applied RS and GIS Techniques in Natural Resource Science*, Vol.1, No.1, PP. 31-49
- Shirazi, M.A. and Boersma, L., 1984, **A Unifying Quantitative Analysis of Soil Texture**, *Soil Science Society of America Journal*, No. 48, PP. 142-147.
- Soil Survey Staff, 1996, **Soil Survey Laboratory Methods Manual**. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 3.0, USDANRCS National Soil Survey Center, Washington, D.C.
- Wei, S., and Mcbratney, A., 2012, **Analysis and Prediction of Soil Properties Using Local Regression-kriging**, *Geoderma*, Vol.171-172, PP. 16-23.

