نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال دهم، شماره یک، پاییز ۱۳۹۹

ISSN 2251-7480

ارزیابی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک با استفاده از طیف‌سنجی در اراضی کشاورزی استان زنجان[۱]

محمد صادق عسکری[۱*]، گلناز رستم‌خانی[۲]، ستاره امانی‌فر[۳]، تورج خوش‌زمان[٤]

۱*) استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*نویسنده مسئول مکاتبات: askari@znu.ac.ir

۲) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳) استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

٤) استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰٤/۱۱

چکیده:

توسعه یک روش دقیق و سریع به منظور ارزیابی تأثیر عملیات زراعی بر کیفیت خاک اهمیت بسیاری در مدیریت پایدار منابع و نظارت بر روشهای مدیریتی در اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. هدف از این پژوهش ارزیابی کارایی طیف‌سنجی به عنوان یک روش کمی و سریع به منظور نظارت بر کیفیت فیزیکی و زیستی خاک تحت مدیریت‌های کشاورزی در استان زنجان بود. بدین منظور ۷۷ نمونه خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری در دو کاربری کشاورزی دیم و آبی جمع‌آوری و مهمترین ویژگی‌های فیزیکی و زیستی مؤثر بر ارزیابی کیفیت خاک در اراضی استان با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. سپس داده‌های طیفی نمونه‌های خاک در محدوده مرئی و مادون قرمز تهیه و مدل‌های طیفی با استفاده از رگرسیون حداقل مربعات جزئی محاسبه شد. میانگین بازتابی طیف‌های خاک در محدوده ۴۵۰ تا ۲۴۵۰ نانومتر، تفاوت معنی‌داری بین کاربری‌ها دیم و آبی ($p < ۰/۰۵$) نشان داد. همچنین نوع کاربری تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۰۱$) بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و زیستی اندازه گیری شده داشت. مدل‌های طیفی با دقت "عالی" ($R^2 > ۰/۸$ و $RPD > ۲/۵$) برای تنفس میکروبی، مقدار رس و کربن آلی خاک، با دقت "خوب" ($R^2 > ۰/۷۶$ و $۲/۵ > RPD > ۲$) برای زیست توده میکروبی، پایداری خاکدانه و مقدار شن و با دقت "متوسط" ($R^2 > ۰/۶۵$ و $۲ > RPD > ۱/۵$) برای جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و مقدار سیلت بدست آمد. درحالیکه ضریب جذب‌پذیری با دقت مناسبی توسط مدل‌های طیفی برآورد نشد. تأثیر عملیات مدیریتی تحت کاربری‌های دیم و آبی با استفاده از بازتاب مشخصه طیفی خاک قابل تمایز بود و بطور کلی داده‌های طیفی قابلیت خوبی برای ارزیابی شناسه‌های زیستی و فیزیکی کیفیت خاک نشان دادند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که تکنیک طیف‌سنجی به همراه تحلیل چند متغیره به عنوان یک رویکرد عملی، سریع، کم هزینه و کمی، می‌تواند جهت ارزیابی فیزیکی و زیستی خاک تحت سامانه‌های مدیریت زراعی در استان زنجان استفاده شود.

کلید واژه‌ها: آنالیز چند متغیره؛ داده های طیفی؛ کاربری‌کشاورزی؛ مدیریت خاک

[۱] برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

مقدمه

خاک یکی از مهمترین منابع طبیعی است که به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی قرار دارد و مدیریت صحیح آن در جهت پایداری کل اکوسیستم از اهمیت زیادی برخوردار است. ارزیابی تأثیر روش‌های مدیریتی بر منابع خاک با بررسی شناسه‌های مربوط به کیفیت خاک انجام می‌شود و کیفیت خاک به عنوان یک ابزار کاربردی برای ارزیابی پایداری سامانه‌های مدیریتی در اراضی کشاورزی پیشنهاد شده است (Herrick *et al*., 2002). کیفیت خاک در ارتباط مستقیم با تولید غذا، امنیت آب و کیفیت سامانه زیستی است (Monreal *et al*., 1997) و ارزیابی دقیق، سریع و کمی کیفیت خاک در اکوسیستم-های کشاورزی یک ابزار ارزشمند را به منظور نظارت بر تأثیر روش‌های مدیریتی بر منابع‌طبیعی در اختیار پژوهشگران و مدیران اراضی قرار می دهد. کیفیت فیزیکی و زیستی از ابعاد مهم کیفیت کلی خاک هستند و بسیاری از عملکردهای خاک مانند تنوع و فعالیت زیستی، توانایی تولید خاک و پایداری فیزیکی خاک که اهمیت بسیاری در رشد گیاه و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی دارند، تحت تاثیر کیفیت فیزیکی و زیستی خاک قرار دارند(Kavdır and Smucker, 2005). محدوده وسیعی از فرآیندهای بیوشیمیایی و فیزیکی خاک در اکوسیستم‌های کشاورزی متأثر از ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک از جمله پایداری خاکدانه‌ها هستند (Amezketa, 2006). کارایی ویژگی‌های بیولوژیکی بر تشخیص تاثیر روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک نیز در منابع بیان شده است (Lima et al., 2013). شناسه‌های بیولوژیکی و فیزیکی کیفیت خاک به تخریب اراضی حساس بوده و می‌تواند برای تشخیص زودهنگام اثرات منفی روش‌های مدیریتی استفاده شود (Askari and Holden, 2014a). روش‌های متداولی که به منظور ارزیابی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک استفاده می‌شوند بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و آنالیزهایی هستند که نیاز به زمان و هزینه زیادی دارد (Cécillon *et al*., 2009). علاوه بر این، ارزیابی و نظارت بر تغییرات زمانی و مکانی این ویژگی‌ها در سطح وسیع نیازمند مطالعات میدانی و نمونه‌برداری-های فراوان است، لذا توسعه روش‌های جایگزین سریع، ارزان و دقیق جهت بررسی کیفیت خاک به یکی از موضوعات مهم پژوهشی در علوم خاک تبدیل شده است (Askari *et al*., 2013).

طیف‌سنجی در محدوده مرئی (VIS) و مادون قرمز نزدیک (NIR) این قابلیت را دارد که به عنوان یک روش جایگزین مؤثر برای اندازه‌گیری همزمان چندین ویژگی خاک مورد استفاده قرار گیرد و می‌تواند یک رویکرد مناسب برای کاهش زمان و هزینه لازم برای نظارت بر شرایط خاک و مدیریت آن فراهم کند (Chodak, 2011). در استفاده از این تکنیک نمونه‌های خاک تخریب نشده و یکپارچگی اولیه سامانه خاک حفظ می‌شود (Bünemann *et al*., 2018). بسیاری از مطالعات انجام شده در ارتباط با ارزیابی طیفی خاک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک همچون برآورد ماده آلی و تعیین مقدار برخی عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف خاک تمرکز داشته‌اند و نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که مقدار ماده آلی، نیتروژن کل، بافت، مقدار رطوبت خاک و غلظت برخی از فلزات با دقت قابل قبولی با استفاده از داده‌های طیفی خاکی قابل برآورد بوده است (Soriano-Disla et al., 2014). نتایج متناقضی برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک گزارش شده است. توانایی داده‌های طیفی در برآورد شناسه‌های کیفیت خاک با نشانه‌های جذبی و انعکاسی گروه‌های عاملی موجود در خاک و یا همبستگی آن شناسه‌ها با ویژگی‌هایی از خاک که مستقیماً بر بازتاب و انتقال نور تأثیر می‌گذارد، در ارتباط است (Soriano-Disla *et al*., 2014). برخی از ویژگی‌های خاک مانند مقدار کربن آلی خاک و توزیع اندازه ذرات خاک مستقیما بر بازتاب‌های طیفی خاک تاثیر می‌گذارند، بنابراین انتظار

می‌رود که با دقت بیشتری توسط داده‌های طیفی قابل برآورد باشند (Zornoza *et al.*, 2008).

Askari و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های طیفی در محدوده مرئی و مادون قرمز توانستند برخی شناسه‌های ثانویه کیفیت فیزیکی خاک را به دلیل روابط نزدیک آن‌ها با مقدار کربن آلی خاک در اراضی کشاورزی کشور ایرلند با دقت خوبی پیش‌بینی کنند. در شرایط اقلیمی مشابه، Gomez و همکاران (۲۰۱۳) بر کارائی طیف‌سنجی برای پیش‌بینی شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک تاکید کردند. آنها شاخص‌های پایداری خاکدانه و توزیع اندازه خاکدانه‌ها را مورد بررسی قرار دادند. علیرغم پژوهش‌های قبلی انجام شده در ارتباط با داده‌های طیفی خاک، قابلیت تکنیک طیف‌سنجی برای پیش‌بینی خصوصیات فیزیکی و بیولوژیکی خاک بویژه در اقلیم های نیمه خشک و در خاک‌های با مقادیر کم ماده آلی، مشخص نیست. پژوهشی توسط Babaeian و همکاران (۱۳۹۲) با هدف ارزیابی عملکرد داده‌های طیفی خاک در برآورد ویژگی‌های مرتبط با ظرفیت نگهداری آب در خاک انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های طیفی خاک می‌توانند به عنوان روشی غیرمستقیم در ارزیابی وضعیت ذخیره آب در خاک مورد استفاده قرار گیرند. کریمی وهمکاران (۱۳۹٦) نشان دادند که داده‌های طیفی می‌تواند به عنوان روشی غیرمستقیم برای برآورد برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله مقدار رس، سیلت، شن، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک با دقت متوسط مورد استفاده قرار گیرد. کارایی طیف سنجی در برآورد مقادیر رس خاک به عنوان یک روش سریع و غیرتخریبی توسط جوزانی‌کهن و همکاران (۱۳۹٤) نیز بررسی شده است. تحقیقات بیشتری در مورد کارایی این تکنیک برای ارزیابی کمی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک برای دستیابی به یک روش قابل اعتماد و کمی برای تحلیل سریع و کم هزینه شرایط خاک تحت مدیریت کشاورزی ضروری است. در یک دهه گذشته روش‌های متفاوتی برای مدل سازی رابطه بین طیف و خصوصیات خاک استفاده شده‌اند که در بین آن‌ها، رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) متداولترین روش است (Askari *et al.*, 2015; Viscarra Rossel *et al.*, 2006).

استان زنجان یکی از قطب‌های کشاورزی در ایران محسوب می‌شود و بخش وسیعی از اراضی آن تحت کاربری کشاورزی قرار دارد. مطالعات قبلی بر اهمیت بررسی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک به‌منظور جلوگیری از فرسایش خاک و افزایش توان تولید اراضی این استان تاکید کرده‌اند (Golchin and Asgari 2008; Hamidi Nehrani et al., 2020). از این رو ایجاد یک روش کمی که امکان بررسی سریع و کارآمد تأثیر عملیات مدیریتی بر شرایط فیزیکی و بیولوژیکی خاک در این منطقه را فراهم کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور، در این پژوهش امکان استفاده از طیف‌سنجی برای پیش‌بینی شناسه‌های کلیدی کیفیت فیزیکی و بیولوژیکی خاک مورد بررسی قرار گرفت. اهداف این پژوهش عبارتند از ۱) بررسی قابلیت طیف‌سنجی برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی و زیستی موثر بر کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان زنجان، ۲) ارزیابی کارایی طیف‌سنجی در تشخیص تاثیر کاربری‌های کشاورزی بر شناسه‌های کیفیت خاک. در این پژوهش ویژگی‌هایی مورد بررسی قرار گرفت که در مطالعات انجام شده توسط Hamidi Nehraniو همکاران (۲۰۲۰) به عنوان ویژگی‌های موثر در ارزیابی کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده بودند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در استان زنجان بین طول جغرافیایی ٤٧ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه

شمالی انجام شد. متوسط دمای سالانه ۱۰/۹٤ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۳۲۰ میلی‌متر است. برای اجرای این پژوهش ۷۷ پایگاه در دو کاربری زراعی (آبی و دیم) انتخاب شد. برای انتخاب پایگاه‌های نمونه-برداری، از اطلاعات نوع کاربری اراضی، اقلیم، اطلاعات زمین‌شناسی و نقشه خاک‌های استان استفاده شده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی عمده خاک‌های منطقه مورد مطالعه در رده اینسپتی‌سول قرار دارند. نمونه-های دست‌خورده و دست‌نخورده، از عمق ۲۰ سانتی‌متر در هر مزرعه تهیه و مختصات نقاط نمونه‌برداری ثبت شد. برای نمونه‌برداری، در هر مزرعه یک پلات با ابعاد ٤۰ در ٤۰ متر که از نظر پوشش سطحی خاک یکنواخت بود، مشخص شد و نمونه خاک دست‌خورده که ترکیبی از پنج زیر نمونه بود، از پنج نقطه (با فاصله تقریبی ۱۰ متر) بصورت تصادفی جمع آوری شد. سه نمونه دست نخورده خاک نیز از مرکز هر پلات با استفاده از استوانه‌های فلزی تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید. در این پژوهش مهمترین ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک که توسط Hamidi Nehrani و همکاران (۲۰۲۰) به عنوان شناسه‌های کلیدی برای ارزیابی کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده بودند، اندازه‌گیری شد. علاوه بر آنها به دلیل اهمیت کربن آلی خاک در ارزیابی طیفی خاک و تاثیر آن بر ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک، مقدار کربن آلی نیز تعیین شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی خاک

جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه فلزی و نمونه دست نخورده اندازه گیری شد (Grossman and Reinsch, 2002). از روش الک‌تر برای اندازه‌گیری ویژگی‌های پایداری خاکدانه استفاده شده و نتایج به-صورت میانگین هندسی قطر خاکدانه (GMD) و میانگین وزنی قطر خاکدانه ها (MWD) محاسبه شد (Nath and Lal, 2017; Nimmo and Perkins, 2002). بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002) اندازه‌گیری و درصد شن و سیلت و رس محاسبه گردید. هدایت هیدرولیکی با استفاده از نمونه های خاک دست نخورده و به روش بار ثابت (Klute and Dirksen, 1986) تعیین شد. کربن آلی خاک به روش والکی–بلاک اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1982). ضریب جذب-پذیری آب در خاک (Sorptivity) با استفاده از یک استوانه به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر مطابق روش توصیف شده توسط Philip (۱۹۵۷) تعیین شد. تنفس میکروبی خاک (SMR) با اندازه گیری مقدار CO_2 که از ۲۵ گرم خاک با رطوبت ظرفیت زراعی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ روز آزاد شد، تعیین شد (Horwath and Paul, 1994). برای اندازه‌گیری کربن زیست توده میکروبی از روش تدخین – استخراج استفاده شد و از اختلاف مقدار کربن آلی در خاک تدخین شده و تدخین نشده محاسبه شد (Vance *et al*., 1987).

تهیه مدل‌های طیفی

قبل از تجزیه و تحلیل طیفی و به منظور حذف تاثیر رطوبت بر نتایج پژوهش، نمونه‌های هوا خشک که از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شده بودند برای مدت زمان ١٤ ساعت در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد خشک شد (Askari *et al*., 2015). از یک دستگاه طیف سنجی مدل Foss ٦٥۰۰ (Foss NIRSystems, Denmark) موجود درمرکز تحقیقات کشاورزی کشور ایرلند برای تهیه طیف‌های بازتابی نمونه‌های خاک استفاده شد. نمونه‌ها به صورت تصادفی اسکن شدند و طیف‌ها با میانگین سه اسکن برای هر نمونه به‌دست آمد. مدل‌های طیفی با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) در محیط نرم‌افزار Unscrambler (version X10.4, CAMO Oslo, Norway) با ۱۵ متغیر پنهان تهیه و ارزیابی گردید. به منظور ایجاد مدل‌های طیفی، نمونه‌ها به‌طور کاملا تصادفی به دو دسته داده‌ها تقسیم شدند. ۷۰ درصد داده‌ها به

منظور واسنجی و ۳۰ درصد داده‌ها جهت اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. یکسان بودن واریانس و میانگین دو گروه از داده‌های واسنجی و اعتبار سنجی بررسی شد. ارزیابی مدل‌ها بر اساس ترکیبی از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص انحراف نسبی برآورد (RPD) انجام شد. RPD با توجه به انحراف معیار داده‌ها (Sd) و خطای استاندارد برآورد (SEP) با استفاده از معادله ۱ و ۲ محاسبه شد (Askari *et al*., 2018; O'Rourke *et al*., 2011).

$$RPD=Sd/SEP \quad (۱)$$

$$SEP = \sqrt{\frac{1}{I-1}\sum_{i=1}^{I}(\hat{y}_i - y_i - Bias)^2} \quad (۲)$$

y_i، مقدار اندازه‌گیری شده، $\hat{y}_i$، مقدار برآورد شده، Bias، مقدار متوسط تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده.

به دلیل تفاوت در واحدها و انحراف معیار ویژگی‌های خاک اندازه گیری شده که تفسیر ریشه میانگین مربعات خطا را مشکل می سازد، دقت مدل‌های طیفی به‌صورت مدل‌های با دقت عالی (RPD≥ ۲/۵ و R^2 ≥۰/۸)، خوب با RPD بین ۲ تا ۲/۵ و R^2≥۰/۷ ، متوسط با RPD بین ۱/۵تا ۲ و R^2 ≥۰/٦ و مدل‌های ضعیف با RPD زیر ۱/۵ و R^2 کمتر از ۰/٦ بیان شدند (Askari et al., 2018).

تجزیه وتحلیل داده‌ها

قبل از تجزیه و تحلیل آماری، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و بررسی هیستوگرام به منظور ارزیابی نرمال بودن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. ویژگی-هایی که توزیع آنها نرمال نبودند با استفاده از روش‌های مرسوم نرمال شدند. مقایسه میانگین داده‌های بین کاربری-های دیم و آبی با استفاده از آزمون t مستقل[1] ($P <$ ۰/۰۵) انجام شد. به منظور بررسی همگن بودن واریانس و تفاوت میانگین بین داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی از آزمون لونس[2] و آزمون t استفاده شد. تجزیه و تحلیل طیفی داده‌ها و رگرسیون حداقل مربعات جزئی در محیط نرم افزار Unscrambler X10.4 انجام شد.

نتایج و بحث

شناسه‌های کیفیت فیزیکی و زیستی خاک

توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک در کاربری‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. مقایسه محدوده ارزشی شناسه‌های اندازه‌گیری در این پژوهش با محدوده گزارش شده برای این ویژگی‌ها در شرایط نیمه خشک ایران (Nabiollahi *et al*., 2018; Rahmanipour *et al*., 2014; Raiesi, 2017) تطابق دارد و نشان می‌دهد که خاک‌های مطالعه شده در محدوده متوسط تا خوبی از نظر کیفیت خاک قرار دارند. بسیاری از عملکردها و نقش‌های خاک به کیفیت فیزیکی و زیستی خاک مربوط شده و با استفاده از شناسه‌های کیفیت خاک قابل بررسی هستند.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین هندسی و وزنی قطرخاکدانه در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۸۷ و ۱/۹۹ میلی‌متر بود. پایداری خاکدانه به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک ویژگی مهم برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده شده است. گزارش شده است که خاکدانه و ساختمان خاک حساسیت بالایی به روش‌های مدیریتی در اراضی کشاورزی دارند (Nath and Lal, 2017). در اراضی نیمه خشک پایداری خاکدانه تحت تاثیر متغیرهای بسیاری از جمله مقدار کربنات‌ها، چرخه مرطوب و خشک شدن خاک و فعالیت‌های زیستی خاک قرار دارد (Boix-Fayos *et al*., 2001).

[1] Independent-samples t-test

[2] Levene's

جدول۱. محاسبات آماری ویژگی‌های فیزیکی وبیولوژیکی خاک

ویژگی خاک	واحد	کمترین	بیشترین	میانگین	انحراف معیار	واریانس
میانگین هندسی قطرخاکدانه	mm	۰/۵۱	۱/۹۳	۰/۸۷	۰/۳۳	۰/۱۱
میانگین وزنی خاکدانه	mm	۰/۵٦	۵/۷۵	۱/۹۹	۱/۳۳	۱/۷۸
جرم مخصوص ظاهری	$g\ cm^{-3}$	۱/۱٤	۱/۵۹	۱/۳٤	۰/۰۸	۰/۰۰۷
تنفس خاک	$mg\ c\ kg^{-1}\ day^{-1}$	۵/٦۸	۱۳/۱٤	۸/٦٦	۱/٤٦	۲/۱۳
کربن زیست توده میکروبی	$mg\ kg^{-1}$	۲۸/٦۵	۵۰۳/۹۱	۲٤۰/۲۰	۱۰۱/٤۰	۱۰۲۸۱/٤٤
کربن آلی	%	۰/۰۵	۱/۲	۰/٤۹	۰/۲۵	۰/۰٦٤
هدایت هیدرولیکی اشباع	$cm\ day^{-1}$	۹/۱۳	۱۰٤/۵۵	٤۷/٦۹	۲۰/۷٦	٤۳۱/۱۲
ضریب جذب پذیری آب	$cm\ s^{-0.5}$	۰/۰۸	۰/۳٤	۰/۲۱	۰/۰٦	۰/۰۰۳
رس	%	۱۰	۷۵	۳۰/۲٤	۱۰/٦۰	۱۱۲/۳۱
شن	%	۳/۲۵	۷۲/۵	۳۷/۲۳	۱۲/۷٤	۱٦۲/۲۳
سیلت	%	۱۲/۵	٤۵	۳۲/۵۳	٦/۲۸	۳۹/٤۸

به استثنای خاک‌های با مقدار زیاد رس‌های انبساط پذیر، ساختمان خاک و پایداری خاکدانه از ویژگی‌های کلیدی برای بررسی خطر فرسایش خاک و توان تولید خاک محسوب می‌شوند. خاکدانه‌سازی می‌تواند بر چرخه عناصر غذایی، رواناب، فرسایش، ذخیره رطوبت و تهویه خاک تاثیرگذار باشد و جهت ارزیابی نقش‌های مختلف خاک در اکوسیستم‌های کشاورزی استفاده شود. همچنین ضریب جذب پذیری آب در محدوده $cm\ s^{-0.5}$ ۰/۰۸ تا $cm\ s^{-0.5}$ ۰/۳٤ و هدایت هیدرولیکی خاک‌های مطالعه شده بین ۹/۱۳ تا ۱۰٤/۵۵ سانتی‌متر در روز بدست آمد (جدول ۱). نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک نیز معمولا به عنوان شاخص‌های کیفیت خاک پیشنهاد می‌شوند و تاثیر بسیاری بر ظرفیت ذخیره رطوبت خاک و جلوگیری از فرسایش خاک دارند (Askari *et al*., 2013). جرم مخصوص ظاهری خاک در محدوده $g\ cm^{-3}$ ۱/۱٤ تا $g\ cm^{-3}$ ۱/۵۹ بود (جدول ۱). این ویژگی نشان دهنده میزان تراکم خاک در اثر خاکورزی و استفاده از ماشین آلات کشاورزی است و بر رشد ریشه، انتقال آب در خاک، تهویه و مقاومت و استحکام خاک تاثیرگذار است (Dexter, 2004). متوسط مقادیر رس، سیلت و شن در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب ۳۰، ۳۷ و ۳۳ درصد بود. بررسی مقدار نسبی ذرات رس، شن و سیلت در ارزیابی توانایی خاک در انتقال آب و عناصر غذایی، فرسایش پذیری و مدل سازی طیفی اهمیت دارد (Cécillon *et al*., 2009).

کربن آلی خاک نیز در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان یکی از حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک شناخته شده است (Askari and Holden, 2014b; Nakajima *et al*., 2015). مقدار کربن آلی خاک منطقه مورد مطالعه در محدوده ۰/۰۵ تا ۱/۲ درصد بود (جدول ۱). کربن آلی بر حاصلخیزی و تأمین عناصر غذایی، کیفیت زیستی و فیزیکی خاک تاثیرگذار است. Nabiollahi و همکاران (۲۰۱۸) و Raiesi (۲۰۱۷) نیز اهمیت مقدار کربن آلی خاک را برای ارزیابی کیفیت خاک در شرایط مشابه این پژوهش را گزارش کرده‌اند. همچنین متوسط مقادیر کربن زیست توده میکروبی خاک و تنفس خاک نیز به ترتیب $mg\ kg^{-1}$ ۲٤۰/۲ و $mg\ c\ kg^{-1}\ day^{-1}$ ۸/٦٦ بدست آمد (جدول ۱). کارایی تنفس و زیست توده میکروبی برای تشخیص تأثیر روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک به خوبی در پژوهش‌های انجام شده نشان داده شده است (Askari and Holden, 2015; Lima *et al*., 2013). تنفس و زیست توده میکروبی حساسیت بالایی به تخریب خاک

دارد و می‌تواند برای تشخیص زود هنگام اثرات مخرب روش‌های مدیریتی استفاده شود (Sparling, 1997).

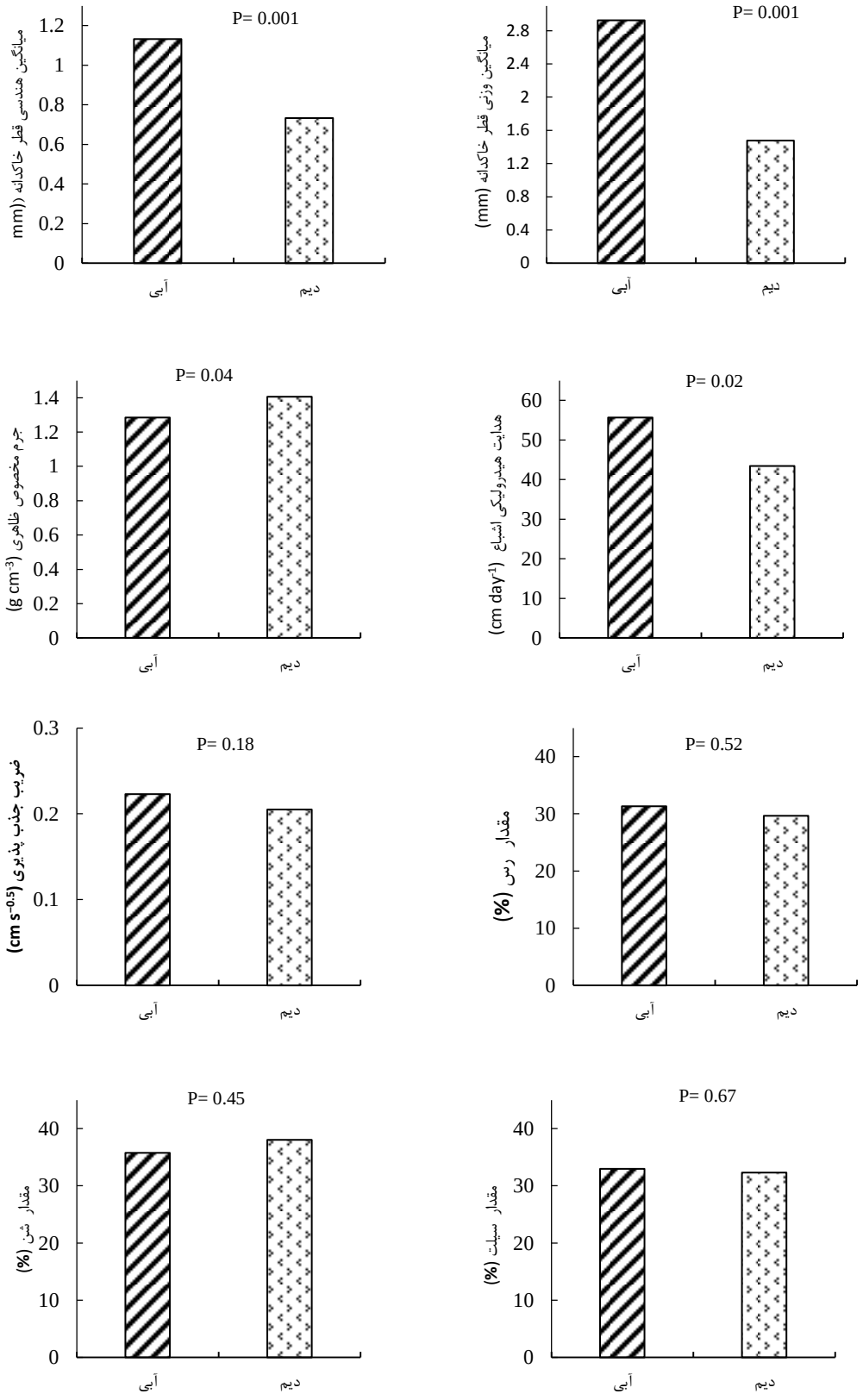
مقایسه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در دو کاربری دیم وآبی

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک بین کاربری دیم و آبی در شکل ۱ خلاصه شده است. نوع کاربری زمین تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۰۱$) بر میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب داشت. تأثیر کاربری بر جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز معنی‌دار بود ($p < ۰/۰۵$). جرم مخصوص ظاهری در کاربری آبی ($۱/۳ \text{ g cm}^{-3}$) پایین‌تر از کاربری دیم ($۱/٤ \text{ g cm}^{-3}$) بود. بیش‌تر بودن کربن آلی خاک در کاربری آبی نسبت به کاربری دیم و همبستگی منفی (جدول۲، $r = -۰/٤۰$) بین جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی خاک می‌تواند دلیل کاهش جرم مخصوص ظاهری در کاربری آبی باشد. ماده‌آلی با بهبود تخلخل خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شود (Franzluebbers *et al.*, 2011). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در کاربری آبی (۲/۹۳ mm) بطور معنی‌داری بالاتر از کاربری دیم (۱/٤۸ mm) بود. در کاربری آبی میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها نیز به‌طور معنی‌داری بالاتر از کاربری دیم بود. همچنین نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در کاربری آبی ($۵۵/٦٦ \text{ cm day}^{-1}$) به‌طور معنی‌داری از کاربری دیم ($٤۳/۳۹ \text{day}^{-1}$) بیشتر بود. هدایت هیدرولیکی اشباع همبستگی منفی معنی‌داری ($r = -۰/۳٤$) با جرم مخصوص ظاهری و همبستگی مثبت معنی‌دار ($r = ۰/٦۲$) با کربن آلی خاک داشت (جدول ۲).

مقدار ماده آلی خاک، تنفس میکروبی و کربن زیست توده میکروبی نیز در کاربری آبی بیشتر از کاربری دیم بود (شکل ۲). با توجه به تشابه کلاس‌های بافتی و نوع خاک، مقدار کمتر کربن آلی خاک در کشاورزی دیم می‌تواند مربوط به شیب اراضی و فرسایش خاک بیشتر در این اراضی نسبت به اراضی تحت کشت آبی باشد. اغلب دیم-زارها در اراضی شیب دار با پتانسیل بالا برای فرسایش آبی و خاک‌های کم عمق قرار دارند و معمولا مقدار کمتری کود آلی دریافت کرده و حذف بقایای کشت قبل در آنها بیشتر است (Vaezi and Bahrami, 2014).

ویژگی‌های زیستی خاک شامل تنفس میکروبی و کربن زیست توده میکروبی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد در دو کاربری دیم و آبی داشتند. کربن زیست‌توده میکروبی همبستگی مثبت معنی‌داری (۰/۷۱ r =) با کربن آلی خاک داشت. کربن آلی بالاتر در کاربری آبی منجر به افزایش جمعیت میکروبی خاک نسبت به کاربری دیم شده است. میانگین تنفس خاک در کاربری دیم نسبت به کاربری آبی کم‌تر بود. علت افزایش تنفس میکروبی در کاربری آبی می‌تواند مقدار بالاتر کربن آلی در این کاربری و همبستگی مثبت و معنی‌دار تنفس میکروبی با کربن آلی خاک باشد. با افزایش ماده آلی تنفس میکروبی نیز افزایش می‌یابد (علمداری و همکاران ۱۳۹۵).

افزایش مقدار ماده آلی خاک و قابل دسترس بودن عناصر غذایی می‌تواند دلیل افزایش فعالیت‌های زیستی تحت مدیریت کشاورزی آبی باشد (Kavvadias et al., 2018). Bending و همکاران (۲۰۰٤) اظهار داشتند که ویژگی های زیستی و فیزیکی برای تشخیص تاثیر روش-های مدیریتی بر کیفیت خاک مؤثرتر از شاخص‌های شیمیایی هستند، با این حال این موضوع به تحقیقات بیشتری نیاز دارد.



شکل ۱. مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی بین دو کاربری آبی و دیم

جدول ۲. ضریب همبستگی بین ویژگی‌های بررسی شده در این پژوهش

	سیلت	شن	رس	ضریب جذب پذیری آب	هدایت هیدرولیکی اشباع	جرم مخصوص ظاهری	میانگین وزنی خاکدانه	میانگین هندسی قطرخاکدانه	کربن زیست توده میکروبی	تنفس خاک	کربن آلی
کربن آلی											۱
تنفس خاک										۱	۰/۷۶**
کربن زیست توده میکروبی									۱	۰/۶۵**	۰/۷۱**
میانگین هندسی قطرخاکدانه								۱	۰/۴۶**	۰/۳۳**	۰/۶۴**
میانگین وزنی خاکدانه							۱	۰/۹۳**	۰/۴۳**	۰/۳۳**	۰/۵۱**
جرم مخصوص ظاهری						۱	-۰/۱۰	-۰/۱۸	-۰/۴۷**	-۰/۴۲**	-۰/۴۰**
هدایت هیدرولیکی اشباع					۱	-۰/۳۴**	۰/۳۴**	۰/۳۵**	۰/۵۱**	۰/۴۹**	۰/۶۲**
ضریب جذب پذیری آب				۱	۰/۳۸**	-۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۱۷	-۰/۰۲	۰/۰۷
رس			۱	۰/۲۲	۰/۰۹	-۰/۲۵*	-۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۱۴	۰/۱۱
شن		۱	-۰/۸۹**	-۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۲۲	۰/۱۱	-۰/۰۵	-۰/۱۳	-۰/۱۶	-۰/۰۳
سیلت	۱	-۰/۵۵**	۰/۱۷	-۰/۲۲	-۰/۲۶*	-۰/۰۸	-۰/۲۳	-۰/۱۸	-۰/۱۱	۰/۰۸	-۰/۱۵

**: معنی‌دار ($p< 0.01$)، *: معنی‌دار ($p< 0.05$)

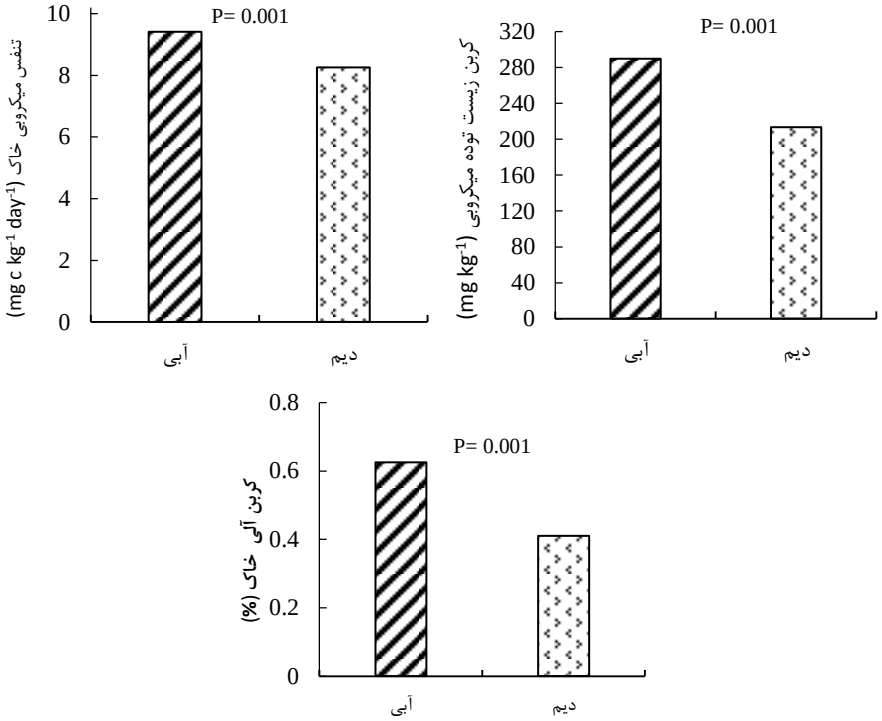
مقایسه طیفی نمونه‌های خاک بین کاربری‌های مختلف

میانگین بازتابی طیف‌های خاک در محدوده مرئی و مادون قرمز (۴۵۰ تا ۲۴۵۰ نانومتر) تفاوت معنی‌داری را بین کاربری‌ها دیم و آبی (شکل ۳) نشان می‌دهد. به دلیل تغییر در آشکارسازهای نوری، یک ناپیوستگی در طول موج ۱۱۰۰ نانومتر مشاهده شد، جایی که طیف‌ها کمی پایین‌تر هستند. این الگو برای تمام طول موج‌ها یکسان است (Askari *et al*., 2015). منحنی‌های طیف بازتابی خاک دارای مشخصه بازتابی در طول موج‌های ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر و همچنین چهار مشخصه جذبی مهم در طول موج‌های۹۹۰، ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر می‌باشند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این مشخصه‌های جذبی مربوط به وجود آب موجود در خاک (۱۴۰۰ نانومتر)، گروه‌های هیدروکسیل موجود در شبکه کانی‌های رسی (۱۹۰۰ نانومتر) و پیوند گروه‌های با فلزات آهن، آلومینیوم و منیزیم (۲۲۰۰ نانومتر) در شبکه کانی‌های رس می‌باشد (Clark et al., 1990). با توجه به مقدار قابل توجه کانی‌های کربناته در خاک‌های مورد مطالعه، مشخصه جذبی در طول موج ۲۳۴۰ نانومتر، می‌تواند به دلیل وجود کربنات و وجود گروه‌های موجود در کانی‌های کربناته باشد (Gomez *et al*., 2012). مقدار ماده آلی خاک، درصد نسبی ذرات رس، سیلت و شن و مقدار رطوبت خاک از عوامل موثر بر بازتاب طیفی خاک به شمار می‌روند در نتیجه این ویژگی‌ها به عنوان متغیرهای اولیه طیفی خاک شناخته می شوند (Askari *et al*., 2015). با کنترل رطوبت نمونه‌ها در این تحقیق، تاثیر رطوبت بر اطلاعات طیفی خاک کنترل گردید.

مقایسه میانگین طیف‌های در هر طول‌موج معنی‌دار بود و اختلاف طیفی بین کاربری دیم و آبی را نشان می دهد (شکل۳، $p < ۰/۰۰۱$). میانگین طیفی برای کاربری آبی دارای بازتاب کمتری نسبت به کاربری دیم است. دلیل تفاوت بین میانگین طیفی خاک در کاربری‌های دیم و آبی می‌توان در تفاوت مقدار ماده آلی خاک بین دو کاربری باشد. هرچه ماده آلی خاک کمتر باشد میزان بازتابش آن بیشتر است و هر چه ماده آلی خاک بیشتر باشد میزان بازتابش آن کمتر است.

این نتایج، تأکید در مطالعات قبلی بر پتانسیل روش‌های طیف سنجی برای ارزیابی کیفیت خاک در اکوسیستم‌های کشاورزی و تشخیص روش‌های مدیریتی را تایید کرد. تمایز کاربری‌های دیم و آبی با استفاده از طیف‌های بازتابی خاک در محدوده مرئی و مادون قرمز، کاربرد مستقیم داده‌های

طیفی به منظور نظارت بر روش‌های مدیریتی اعمال شده در هر کاربری را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مقایسه میانگین تنفس میکروبی، کربن زیست توده میکروبی و کربن آلی خاک بین دو کاربری آبی و دیم

شکل ۳. میانگین بازتاب طیفی در دو کاربری آبی و دیم

مدل‌های طیفی برآورد شناسه های کیفیت خاک

قبل از انجام برآوردهای طیفی، همگن بودن واریانس شناسه‌های انتخابی با استفاده از آزمون لونس تایید و نتایج مقایسه میانگین (آزمون t) نیز نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین میانگین داده‌های واسنجی و داده‌های اعتبار سنجی وجود ندارد ($P > ۰/۰۵$). جدول شماره ۳ و ٤ خلاصه نتایج حاصل از مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای واسنجی و اعتبار سنجی شناسه‌های فیزیکی و زیستی خاک را نشان می‌دهند. بررسی‌ها نشان داد که کربن آلی، تنفس میکروبی و مقدار رس خاک دقیق‌ترین مدل‌های پیش‌بینی را داشتند و هدایت هیدرولیکی و

ضریب جذب‌پذیری خاک دارای کمترین دقت مدل پیش‌بینی بودند. برآورد با دقت "عالی" برای کربن آلی خاک، تنفس میکروبی و مقدار رس خاک (R^2 >۰/۸ و ۲/۵ >RPD)، برآورد "خوب" برای زیست توده میکروبی، میانگین هندسی و وزنی قطر خاکدانه و مقدار شن (R^2 >۰/۷۶ و ۲/۵ >RPD>۲)، برآورد "متوسط" برای هدایت هیدرولیکی اشباع، جرم مخصوص ظاهری و مقدار سیلت (R^2 >۰/۶۵ و ۲ >RPD>۱/۵) و پیش‌بینی "ضعیف" برای ضریب جذب‌پذیری خاک (R^2 <۰/۶ و ۱/۵ >RPD) به‌دست آمد. بیشترین دقت برآورد مربوط به رس خاک (جدول ۳: R^2 =۰/۸٤ و RPD=۲/۹٦) و کربن آلی خاک (جدول ٤: R^2 =۰/۸۵ و RPD=۲/٦۳) است.

برآورد دقیق کربن آلی خاک (جدول ٤) مطابق با مطالعات قبلی بود (Allory *et al*., 2019; O'Rourke et *al*., 2011) و احتمالا به دلیل انرژی جذبی و بازتابی پیوندهای ملکولی کربن و ترکیبی از گروه‌های C-H، N-H، C-O، C-N و O-H در ترکیبات آلی خاک است (Vasques *et al*., 2008). همچنین در توافق با پژوهش‌های قبلی مدل‌های طیفی دقت خوبی برای برآورد مقدار رس و شن خاک داشتند. کربن آلی خاک، ذرات شن و رس را می‌توان به عنوان شناسه‌های اصلی برای تجزیه و تحلیل طیفی خاک در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفت زیرا در نتیجه پیوندهای مولکولی یا انتقال و بازتاب نور تأثیر مستقیمی بر داده‌های طیفی خاک دارند. دقت برآورد مدل‌های طیفی به برخی اجزای خاک مانند کوارتز (شن) و انواع مختلفی از رس‌ها که در بر همکنش طول موج‌های مادون قرمز در محیط خاک تاثیر گذارند، متکی هستند (Tümsavaş *et al*., 2019). دقت‌های پایین‌تری برای مقدار سیلت خاک گزارش شده است (Jaconi *et al*., 2019)، که احتمالاً در نتیجه عدم قطعیت در مورد ماهیت و تاثیر طیفی دقیق اجزای خاک مرتبط با این اندازه ذرات است.

پیش‌بینی با دقت خوب از تنفس میکروبی، زیست توده میکروبی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و برآورد مناسب جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌تواند مربوط به همبستگی آن‌ها با شناسه‌هایی باشد که دارای تاثیر مستقیم بر پاسخ های طیفی خاک مانند کربن‌خاک، رس و شن باشد (جدول ۲). از آنجا که پایداری خاکدانه، جرم مخصوص ظاهری، تنفس و زیست‌توده میکروبی از ویژگی‌های ثانویه خاک هستند که مستقیماً بر تابش مرئی و مادون قرمز خاک تاثیر ندارند، برآورد این ویژگی‌ها معمولا به همبستگی آن‌ها با ویژگی‌های اولیه طیفی خاک، نسبت داده می‌شود (Soriano-Disla et al., 2014). زیست توده میکروبی مسئول۸۰ تا ۹۰ درصد از تحولات بیوشیمیایی در خاک است (Nannipieri et al., 2003). اگرچه کربن زیست توده میکروبی دارای رنج گسترده‌ای است، اما به طور معمول کمتر از ٤ درصد محتوای کل کربن خاک را شامل می‌شود (Reeves *et al*., 2000). بنابراین دقت خوب برآورد طیفی آن نتیجه همبستگی بالای این ویژگی با کمیت (Rasche et al., 2013) و کیفیت (Chodak *et al*., 2007) ماده آلی خاک است. کربن آلی با تنفس میکروبی نیز همبستگی مثبت دارد (r =۰/۷٦)، و می‌تواند بطور غیرمستقیم بر برآورد طیفی آن تاثیر گذار باشد.

کربن آلی خاک یک عامل کنترل کننده مثبت بر سطح پایداری خاکدانه در خاک است (Dhaliwal *et al*., 2018). مهمترین طول موج‌ها برای پیش بینی پایداری خاکدانه در محدوده طول موج‌های ٤۰۰–٦۰۰ نانومتر، ۱۸۰۰–۱۹۰۰ نانومتر و ۲۳۰۰–۲۲٤۰۰ نانومتر شناخته شده است که با رنگ خاک (تیرگی و روشنی) و ترکیبات آلی خاک مانند لیگنین و سلولز و گروه‌های عاملی فنلی، آمید و آلیفاتیک مربوط می‌شوند (Ben-Dor *et al*., 1997; Castaldi *et al*., 2018). برآورد مناسب جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز می‌تواند ناشی از همبستگی با مقدار رس، شن و کربن خاک باشد (جدول ۲). در حالی که

هیچ مدل طیفی برای ضریب جذب پذیری خاک در منابع یافت نشد، عدم همبستگی آن با ویژگی‌های اولیه طیفی می‌تواند دلیل عدم موفقیت طیف‌سنجی در برآورد ضریب جذب پذیری خاک در این پژوهش باشد (جدول ۲).

نتایج مدل‌های طیفی خاک نشان داد ویژگی‌های زیستی و کربن خاک با دقت خوب تا عالی برآورد شدند و پیش‌بینی شناسه‌های فیزیکی به استثنای ضریب جذب-پذیری آب، متوسط تا عالی بود. کارایی طیف‌سنجی در برآورد ویژگی‌های کلیدی ارزیابی کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه که به‌صورت مستقیم (پایداری خاکدانه، مقدار رس و شن، تنفس زیستی و زیست توده میکروبی) یا غیرمستقیم (کربن آلی خاک) بر کیفیت فیزیکی و زیستی خاک تاثیر گذارند، نشان داد که داده‌های طیفی دارای اطلاعات کافی برای کمی‌سازی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک و در نتیجه کیفیت کلی خاک هستند. معمولاً ویژگی‌های فیزیکی، زیستی و کربن خاک جزء مهمترین شناسه‌های موجود در حداقل داده‌های موثر بر کیفیت خاک شناسایی می‌شوند (Cécillon *et al.*, 2009). از آنجایی که روش‌های متداول برای تعیین توزیع اندازه ذرات خاک بسیار وقت‌گیر و گران هستند، مطالعه حاضر نشان داد، طیف‌سنجی در محدوده مرئی و مادون قرمز روش سریع و ارزانی جهت تحلیل توزیع اندازه ذرات خاک در اختیار محققین قرار می‌دهد. Jaconi و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که دقت تخمین بافت خاک با استفاده از طیف‌سنجی برای بسیاری از مطالعات خاک کافی است. در یک تجزیه و تحلیل اقتصادی که برای تعیین مقدار کربن آلی خاک که در آن روش‌های طیفی سنجی (VIS-NIR) با روش جدید آزمایشگاهی (دستگاه احتراقی تعیین کربن) مقایسه شده است (O'Rourke *et al.*, 2011)، روش‌های طیف‌سنجی به دلیل زمان آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام اندازه‌گیری مقرون به صرفه‌تر بودند.

ارزیابی کمی، موثر و کم هزینه برخی از ویژگی‌های فیزیکی و زیستی که به عنوان موثرترین شناسه‌های کیفیت خاک شناسایی شده‌اند با استفاده از داده‌های طیفی خاک، باعث تصمیم‌گیری بهتر در مدیریت سیستم‌های کشاورزی در اراضی استان زنجان و مناطقی با شرایط خاک و اقلیم مشابه می‌شود. اجرای عملیات نظارتی با استفاده از تصویر برداری فراطیفی و طیف‌نگارهای قابل حمل به عنوان روش‌های جدیدی برای ارزیابی رقومی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک به منظور مقابله با تهدیدات مرتبط با خاک در کوتاه‌ترین زمان ممکن شناخته شده است (Mohamed *et al.*, 2018). این روش با توجه به قابلیت‌هایی که دارد از جمله نمونه‌برداری با وضوح زمانی و مکانی بیشتر و با هزینه کمتر، می‌تواند پیامدهای مهمی برای مدیریت پایدار کشاورزی داشته باشد. یکی از مزایای استفاده از تکنیک‌های طیف‌سنجی مدل‌سازی ویژگی‌های خاک برای ابعاد مختلف کیفیت خاک است (Askari *et al.*, 2015).

جدول ۳. پارامترهای آماری مربوط به مدل‌های برآورد خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات خاک	تعداد متغیرهای نهفته	RPD	مدل	R^2	RMSE
میانگین هندسی قطر خاکدانه	٤	۲/۱۱	واسنجی	۰/۸۵	۰/۱۱۳
			اعتبارسنجی	۰/۸۵	۰/۱۵۷
میانگین وزنی قطر خاکدانه	۵	۲/۰۲	واسنجی	۰/۷٤	۰/٦۰۲
			اعتبارسنجی	۰/۷٤	۰/٦٤۸
جرم مخصوص ظاهری	۳	۱/۷۹	واسنجی	۰/۷۲	۰/۰٤۳
			اعتبارسنجی	۰/٦۸	۰/۰٤٦
هدایت هیدرولیکی اشباع	۳	۱/۹۸	واسنجی	۰/٦۵	۹/۲۳
			اعتبارسنجی	۰/۵۵	۱۰/۳٦

خصوصیات خاک	تعداد متغیرهای نهفته	RPD	مدل	R^2	RMSE
ضریب جذب پذیری آب	۲	۱/۱۷	واسنجی	۰/۰۵	۰/۰۶
			اعتبارسنجی	۰/۰٤	۰/۰۵
رس	۳	۲/۹٦	واسنجی	۰/۸۸	۳/۲۷
			اعتبارسنجی	۰/۸٤	۳/٦۳
شن	۳	۲/٤۹	واسنجی	۰/۸٦	۵/۱۳
			اعتبارسنجی	۰/۷٦	۵/۲٤
سیلت	۲	۱/۸۵	واسنجی	۰/٦۸	۳/۷۰
			اعتبارسنجی	۰/٦۵	۳/۳٤

جدول ٤. پارامترهای آماری مربوط به مدل‌های برآورد خصوصیات بیولوژیکی و کربن خاک

خصوصیات خاک	تعداد متغیرهای نهفته	RPD	مدل	R^2	RMSE
کربن زیست توده میکروبی	۳	۲/۲۷	واسنجی	۰/۸٦	۳٦/۷٦
			اعتبارسنجی	۰/۸۳	٤٤/۳۱
تنفس میکروبی	۳	۲/۵٦	واسنجی	۰/۸۸	۰/٤۷
			اعتبارسنجی	۰/۸۳	۰/۵۷
کربن آلی	۳	۲/٦۳	واسنجی	۰/۹۱	۰/۰۸
			اعتبارسنجی	۰/۸۵	۰/۰۹

ارزیابی کلی تاثیر نوع کاربری و روش‌های مدیریتی بر اساس طیف‌های خاک می‌تواند اطلاعات کافی را برای بسیاری از اهداف کشاورزی فراهم کند. ارزیابی بسیار دقیق کیفیت خاک همیشه برای تصمیم گیری‌های مدیریتی لازم نیست و کمی‌سازی با دقت قابل قبول نیز می‌تواند برای تصمیمات مدیریتی صحیح کافی باشد (Cécillon *et al.*, 2009). توانایی طیف‌سنجی برای برآورد هم زمان چندین ویژگی خاک به‌خوبی در پژوهش‌ها بررسی شده است و این تحقیق نشان داد که روش طیف‌سنجی می‌تواند به‌طور مستقیم جهت ارزیابی مدیریت ساختمان خاک، فعالیت‌های زیستی خاک و نظارت بر کیفیت فیزیکی و زیستی خاک استفاده شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مهمترین ویژگی‌های فیزیکی و زیستی که به عنوان موثرترین شناسه‌های کیفیت خاک در اراضی مورد مطالعه شناسایی شده بودند با استفاده از تکنیک‌های طیف سنجی مورد بررسی قرار گرفت. شناسه‌های کلیدی کیفیت فیزیکی و زیستی خاک با دقت عالی (تنفس میکروبی، مقدار رس، کربن آلی خاک)، خوب (زیست توده میکروبی، پایداری خاکدانه، مقدار شن) و متوسط (جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع، مقدار سیلت) با استفاده از روش طیف سنجی برآورد شدند. کربن آلی خاک، مقدار رس و شن که از شناسه‌های اصلی برای تجزیه و تحلیل طیفی خاک محسوب می‌شوند، به دلیل انرژی جذبی و بازتابی پیوندهای ملکولی و یا تأثیر مستقیم آنها بر طیف‌های بازتابی خاک با دقت خوبی برآورد شدند. دقت بالا در پیش‌بینی‌های طیفی سایر ویژگی‌های زیستی و فیزیکی مربوط به همبستگی آن‌ها با خصوصیاتی(کربن آلی، رس و شن) است که به‌طور مستقیم بر طیف‌های خاک تأثیر گذارند. با استفاده از داده-های طیفی‌خاک، تاثیر عملیات مدیریتی بر کیفیت خاک

تحت کاربری‌های دیم و آبی قابل تمایز بود. تشابه خاک-ها در دو کاربری نشان دهنده قابلیت تکنیک طیف‌سنجی در تشخیص تأثیر روش‌های مدیریتی بر کیفیت خاک بین این دو کاربری است. تفاوت میانگین طیف‌ها بین کاربری‌های کشاورزی و توانایی برآورد مهمترین ویژگی-های زیستی، کربن آلی خاک و برخی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک در منطقه مورد مطالعه، نشان داد که طیف-سنجی می‌تواند یک روش قابل اعتماد، سریع و کم هزینه برای ارزیابی کمی ویژگی‌های زیستی و فیزیکی خاک تحت سامانه‌های مرسوم مدیریت کشاورزی در استان زنجان فراهم کند. این تکنیک شرایط را برای نظارت بهتر بر روش‌های مدیریتی و ارزیابی معمول کیفیت خاک در سطح وسیعی از اراضی مناطق نیمه خشک بدون محدودیت در تعداد نمونه‌ها به دلیل هزینه و زمان نمونه برداری، فراهم می‌کند.

منابع مورد استفاده

جوزانی‌کهن، گ.، نوروزی، غ.، سحابی، ف.، اوجانی، ح. ۱۳۹۵. مقایسه روشهای شناخت کانی‌های رسی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و پتروفیزیکی در یکی از میادین گازی شرق کپه‌داغ. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن. ۱۱ (۳۰): ۱۱-۱.

کریمی، ص.، داوری، م.، بهرامی، ح.، بابائیان، ا.، حسینی، س.م.ط. ۱۳۹۶. برآورد برخی ویژگی‌های مبنایی خاک توسط طیف-سنجی مرئی – مادون قرمز نزدیک در استان کردستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ٤٨ (٣) : ٥٨٥-٥٧٣.

علمداری، پ.، رضایی، ب.، گلچین، ا. ۱۳۹۵. اثر تغییر کاربری بر خصوصیات کیفی و کانی‌شناسی رس خاک در منطقه والارود استان زنجان. دانش آب و خاک. ٢٦(١): ٣١٦-٣٠٥.

Allory, V., Cambou, A., Moulin, P., Schwartz, C., Cannavo, P., Vidal-Beaudet, L. and Barthès, B.G. 2019. Quantification of soil organic carbon stock in urban soils using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in situ or in laboratory conditions. Science of The Total Environment, 686: 764-773.

Amezketa, E. 2006. An integrated methodology for assessing soil salinization, a pre-condition for land desertification. Journal of Arid Environments, 67: 594-606.

Askari, M.S., Cui, J. and Holden, N.M. 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. Soil and Tillage Research, 134: 1-10.

Askari, M.S., Cui, J., O'Rourke, S.M. and Holden, N.M. 2015a. Evaluation of soil structural quality using VIS–NIR spectra. Soil and Tillage Research, 146: 108-117.

Askari, M.S. and Holden, N.M. 2014a. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma , 230-231: 131-142.

Askari, M.S. and Holden, N.M. 2014b. Rapid Evaluation of Soil Quality Based on Soil Carbon Reflectance, Soil Carbon. Springer, 117-126 pp.

Askari, M.S. and Holden, N.M. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. Soil and Tillage Research, 150: 57-67.

Askari, M.S., O'Rourke, S.M. and Holden, N.M. 2015. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible–near-infrared spectroscopy. Geoderma, 243-244: 80-91.

Askari, M.S., O'Rourke, S.M. and Holden, N.M. 2018. A comparison of point and imaging visible-near infrared spectroscopy for determining soil organic carbon. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 26: 133-146.

Babaeian, E., Homaee, M., Montzka, C., Vereecken, H. and Norouzi, A.A. 2015. Towards Retrieving Soil Hydraulic Properties by Hyperspectral Remote Sensing. Vadose Zone Journal, 14:1-17

Ben-Dor, E., Inbar, Y. and Chen, Y. 1997. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. Remote Sensing of Environment, 61: 1-15.

Bending, G.D., Turner, M.K., Rayns, F., Marx, M.-C. and Wood, M. 2004. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. Soil Biology and Biochemistry, 36: 1785-1792.

Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C. and Soriano-Soto, M.D. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. Catena, 44: 47-67.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W. and Brussaard, L. 2018. Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry, 120: 105-125.

Castaldi, F., Chabrillat, S., Chartin, C., Genot, V., Jones, A.R. and van Wesemael, B. 2018. Estimation of soil organic carbon in arable soil in Belgium and Luxembourg with the LUCAS topsoil database. European Journal of Soil Science, 69: 592-603.

Cécillon, L., Barthès, B.G., Gomez, C., Ertlen, D., Genot, V., Hedde, M., Stevens, A. and Brun, J.J. 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). European Journal of Soil Science, 60: 770-784.

Chodak, M. 2011. Near-infrared spectroscopy for rapid estimation of microbial properties in reclaimed mine soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 174: 702-709.

Chodak, M., Niklińska, M. and Beese, F. 2007. Near-infrared spectroscopy for analysis of chemical and microbiological properties of forest soil organic horizons in a heavy-metal-polluted area. Biology and Fertility of Soils, 44: 171-180.

Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A. and Vergo, N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95: 12653-12680.

Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120: 201-214.

Dhaliwal, J., Kukal, S.S. and Sharma, S. 2018. Soil organic carbon stock in relation to aggregate size and stability under tree-based cropping systems in Typic Ustochrepts. Agroforestry Systems, 92: 275-284.

Franzluebbers, A., Causarano, H. and Norfleet, M. 2011. Soil conditioning index and soil organic carbon in the Midwest and southeastern United States. Journal of soil and water conservation, 66: 178-182.

Gee, G.W. and Or, D. 2002. Particle-Size Analysis. In Dane, J. H. & Topp, G. C. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Book Series, 5: 255-289.

Golchin, A. and Asgari, H. 2008. Land use effects on soil quality indicators in north-eastern Iran. Soil Research, 46(1): 27-36.

Gomez, C., Lagacherie, P. and Coulouma, G. 2012. Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis–NIR data. Geoderma, 189-190: 176-185.

Gomez, C., Le Bissonnais, Y., Annabi, M., Bahri, H. and Raclot, D. 2013. Laboratory Vis–NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. Geoderma, 209-210: 86-97.

Grossman, R.B. and Reinsch, T.G. 2002. Bulk density and Linear Extensibility., In Dane, J. H. & Topp, G. C. Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Book Series, 5: 201-225.

Hamidi Nehrani, S., Askari, M.S., Saadat, S., Delavar, M.A., Taheri, M. and Holden, N.M. 2020. Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. Ecological Indicators, 108: 105770.

Herrick, J.E., Brown, J.R., Tugel, A.J ,.Shaver, P.L. and Havstad, K.M. 2002. Application of Soil Quality to Monitoring and Management. Agronomy Journal, 94: 3-11.

Horwath, W.R. and Paul, E.A. 1994. Microbial biomass . In Weaver, R W, Angle JS, Bottomley PS., Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Soil Science Society of America Book Series, 5: 753-773.

Jaconi, A., Vos, C. and Don, A. 2019. Near infrared spectroscopy as an easy and precise method to estimate soil texture. Geoderma, 337: 906-913.

Kavdır, Y. and Smucker, A.J. 2005. Soil aggregate sequestration of cover crop root and shoot-derived nitrogen. Plant and soil, 272: 263-276.

Kavvadias, V., Papadopoulou, M., Vavoulidou, E., Theocharopoulos, S., Malliaraki, S., Agelaki, K., Koubouris, G. and Psarras, G. 2018. Chapter 10 - Effects of Carbon Inputs on Chemical and Microbial Properties of Soil in Irrigated and Rainfed Olive Groves, in: Muñoz, M.Á., Zornoza, R. (Eds.), Soil Management and Climate Change. Academic Press, 137-150.

Klute, A. and Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods In: Klute, A. (Ed.), Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods, 687-734.

Lima, A.C.R., Brussaard, L., Totola, M.R., Hoogmoed, W.B. and de Goede, R.G.M. 2013. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. Applied Soil Ecology, 64: 194-200.

Mohamed, E.S., Saleh, A.M., Belal, A.B. and Gad, A.A. 2018. Application of near-infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21: 1-14.

Monreal, C., Dinel, H., Schnitzer, M., Gamble, D. and Biederbeck, V. 1997. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture. in: Lal, R.,

Kimble, J.M., Follett, R.F. and Stewart, B.A. (Eds) Soil Processes and the Carbon Cycle, Chapter 30: 435-458.

Nabiollahi, K., Golmohamadi, F ,.Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R. and Davari, M. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. Geoderma, 318: 16-28.

Nakajima, T., Lal, R. and Jiang, S. 2015. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. Soil and Tillage Research, 146: 323-328.

Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G. and Renella, G. 2003. Microbial diversity and soil functions. European Journal of Soil Science, 54: 655-670.

Nath, A.J. and Lal, R. 2017. Effects of Tillage Practices and Land Use Management on Soil Aggregates and Soil Organic Carbon in the North Appalachian Region, USA. Pedosphere, 27: 172-176.

Nimmo, J.R. and Perkins, K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution methods of soil analysis. In Dane J H, Topp G C (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science of America, Madison.5: 317–328.

O'Rourke, S.M., Argentati, I. and Holden, N.M. 2011. The Effect of Region of Interest Size on Model Calibration for Soil Organic Carbon Prediction from Hyperspectral Images of Prepared Soils. Journal of Near Infrared Spectroscopy 19: 161-170.

Philip, J. 1957 .The theory of infiltration: 4: Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil science, 84: 257–335.

Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H.A., Fereidouni, Z. and Bandarabadi, S.R. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. Ecological Indicators, 40: 19-26.

Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. Ecological Indicators, 75: 307-320.

Rasche, F., Marhan, S., Berner, D., Keil, D., Kandeler, E. and Cadisch, G. 2013. midDRIFTS-based partial least square regression analysis allows predicting microbial biomass, enzyme activities and 16S rRNA gene abundance in soils of temperate grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 57: 504-512.

Reeves, J.B., McCarty, G.W. and Meisinger, J.J. 2000. Near Infrared Reflectance Spectroscopy for the Determination of Biological Activity in Agricultural Soils. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 8: 161-170.

Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., Macdonald, L.M. and McLaughlin, M.J. 2014. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. Applied Spectroscopy Reviews, 49: 139-186.

Sparling, G.P. 1997. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. In: Pankhurst, C., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (Eds.), Biological Indicators of Soil Health. CAB International, Wallingford, UK, , 97–119.

Tümsavaş, Z., Tekin, Y., Ulusoy, Y. and Mouazen, A.M. 2019. Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. Biosystems Engineering, 177: 90-100.

Vaezi, A. and Bahrami, H., 2014. Relationship between soil productivity and erodibility in rainfed wheat lands in northwestern Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 16: 1455-1466.

Vance, E.D., Brookes, P.C. and Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 19: 703-707.

Vasques, G.M., Grunwald, S. and Sickman, J.O. 2008. Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. Geoderma, 146:14-25.

Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J. and Skjemstad, J.O. 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma, 131: 59 –75.

Zornoza, R., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Scow, K.M., Arcenegui, V. and Mataix-Beneyto, J. 2008. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. Soil Biology and Biochemistry, 40: 1923-1930.

ISSN 2251-7480

Evaluation of physical and biological soil quality using spectroscopy in agricultural lands of Zanjan province

Mohammad Sadegh Askari[1*], Golnaz Rostamkhani[2], Setareh Amanifar[3] and Toraj Khoshzaman[4]

1*) Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.
*Corresponding author email: askari@znu.ac.ir
2) M.Sc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.
3) Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.
4) Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research Center, Zanjan Province.

Received: 30-11-2019 Accepted: 01-07-2020

Abstract

Developing a precise and rapid method for assessing the impact of farming operations on soil quality is important for sustainable resource management and monitoring management approaches in agricultural ecosystems. The objective of this study was to evaluate the efficiency of spectroscopy as a rapid and quantitative approach for monitoring physical and biological soil quality under agricultural management in Zanjan province. 77 soil samples were collected from the depth of 0-20 cm under irrigated and rain-fed agriculture. Important physical and biological properties, affecting soil quality in this province, were measured using standard methods. Then, soil spectral data were determined in VIS-NIR region and spectral models were calculated using partial least square regression. The average reflectance of soil spectra from 450 to 2450 nm, were significantly different ($p<0.05$) between rain-fed and irrigated land uses. Moreover, land use type had a significant impact on most physical and biological properties, measured in this study. Spectral models with excellent accuracy(RPD>2.5 and $R^2>0.8$) were noted for soil microbial respiration, clay content and soil organic content. The models with good accuracy ($2<RPD<2.5$ and $R^2>0.76$) for microbial carbon biomass, aggregate stability, sand content and with moderate accuracy ($1.5<RPD<2$ and $R^2>0.65$) for bulk density, hydraulic conductivity and silt content were obtained. However, sorptivity was not estimated with appropriate accuracy using spectral models. The effect of management operations under irrigated and rain-fed land use was detectable using soil reflectance spectral signature, and spectral data showed an overall good ability for evaluating physical and biological indicators of soil quality. The results of this study indicate that spectroscopic technique along with multivariate analysis, as a practical, rapid, low cost and quantitative approach, can be used to evaluate physical and biological soil quality under agricultural management systems in Zanjan Province.

Keywords: Multivariate analysis; Spectral data; Agricultural land use; Soil management.