

ارزیابی کمی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف در بخشی از اراضی جنوب شرق قزوین

منوچهر گرجی^۱، جلیل کاکه^{۲*}، علیرضا علی محمدی^۳

۱. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۷/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۲۶)

چکیده

یکی از ابزارهای مفید برای بررسی وضعیت مدیریت خاک در کاربری‌های مختلف، ارزیابی کیفیت خاک است و استفاده از شاخص‌های کمی، یکی از مناسب‌ترین روش‌های تعیین و مقایسه کیفیت خاک‌ها می‌باشد. در این تحقیق شاخص‌ها و روش‌های انتخاب ویژگی‌های مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفتند. ۱۷ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در پنج کاربری باغ، مرتع، زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده در سه کلاس شیب کمتر از ۲، ۷-۵ و ۱۱-۹ درصد، در جنوب شرق قزوین به عنوان مجموعه کل داده‌های (Total Data Set) انتخاب شدند. سپس با استفاده از روش تجزیه مولفه‌های اصلی (Component Analysis Principle)، هفت ویژگی به عنوان دسته داده‌های حداقل (Minimum data set) انتخاب شدند. با استفاده از دو شاخص کیفیت تجمعی (Integrated quality index) و شاخص کیفیت نمره (Nemero quality index) در این دو مجموعه داده، کیفیت خاک ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربری‌های باغ و مرتع به ترتیب بیشترین مقدار شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره را در هر دو مجموعه داده به خود اختصاص می‌دهند اما کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده دارای کمترین کیفیت خاک هستند و تفاوت محسوسی با دو کاربری باغ و مرتع دارند. ضریب تبیین بین دو مجموعه داده برای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۸ است که بیانگر قابل اطمینان بودن استفاده از دسته داده‌های حداقل به جای مجموعه کل داده‌ها و همچنین کارایی بهتر شاخص کیفیت تجمعی برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمره، مجموعه کل داده‌ها، دسته داده‌های حداقل، کاربری اراضی.

مقدمه

استفاده پایدار از منابع طبیعی و ایجاد تعادل بین میزان تولید محصول و بهبود کیفیت منابع طبیعی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان خاک جزء بسیار مهم پایداری زیست‌بوم‌هاست که برای نیل به توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی، مطالعه آن الزامی است، اما پیچیدگی‌های موجود در خاک به طور جدی اطلاعات ما را در چگونگی کارکردهای آن محدود کرده است (Karlen et al., 2008). یکی از روش‌های بررسی وضعیت خاک، ارزیابی کیفیت خاک است. با این وجود کیفیت خاک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و باید از شاخص‌های مربوطه استنتاج شود. شاخص‌های کیفیت خاک، مجموعه‌ای از ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک هستند

که ظرفیت آن برای تولید محصول یا عملکرد زیست محیطی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و به تغییر کاربری اراضی، مدیریت یا عملیات حفاظتی حساس می‌باشند (Brejda et al., 2000; Aparicio and Costa, 2007).

ارزیابی کیفیت خاک در سال‌های اخیر پیشرفت قابل توجهی کرده است. در مقیاس جهانی به سبب اهمیت تغییرات محیط زیست، بهبود روش‌های ارزیابی کیفیت خاک برای توسعه کشاورزی پایدار و نیز تشخیص پایداری مدیریت خاک و سامانه‌های کاربری زمین ضروری است (Wang and Gong, 1998). از این رو به دست آوردن روش‌ها و شاخص‌های مناسب ارزیابی کیفیت خاک به علت تاثیر مهم آن بر نتیجه‌گیری و قضاوت نهایی در مورد وضعیت کیفیت و مدیریت خاک، از جمله مهم‌ترین مسائل مورد توجه است. تا به حال روش‌های متنوعی برای جمع‌آوری داده‌ها، اندازه‌گیری و ارزیابی کیفیت خاک مورد

* نویسنده مسئول: Jalil.kaka@ut.ac.ir

استفاده قرار گرفته‌اند. از روش‌های عمدتاً کیفی تا کاملاً کمی شامل کارت‌های نمره‌دهی (scorecards)، ارزیابی بصری خاک (visual soil assessments)، بسته‌های مزرعه‌ای (field kits)، آمایش خاک (soil surveys) و تجزیه‌های آزمایشگاهی در تعیین کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Bone et al., 2012). در بین این روش‌ها، امروزه تجزیه‌های آزمایشگاهی متداول‌ترین روش است، که برتری آن‌ها، امکان استفاده آسان، انعطاف پذیری و کمی بودن ویژگی‌های موثر بر شاخص‌های مختلف کیفیت خاک است (Bone et al., 2012). پارامترهای موثر بر شاخص‌های کیفیت خاک به صورت فرآیندها و ویژگی‌هایی از خاک تعریف می‌شوند که به تغییرات مدیریت خاک حساس هستند. این ویژگی‌ها می‌توانند مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از آن‌ها باشند. محققان مختلف، مجموعه‌های متفاوتی از ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک را برای تعیین شاخص‌های کیفیت خاک پیشنهاد نموده‌اند (Reynolds et al., 2009; Doran and Parkin, 1994). برخی از این محققین شاخص کیفیت خاک را بر اساس مجموعه‌ی کل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک تعیین کرده‌اند (Karlen et al., 1998; Doran and Parkin, 1994) و برخی دیگر تعداد محدودتری از ویژگی‌هایی از خاک را که نماینده بهتری از کیفیت خاک بودند، به عنوان دسته‌ی حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک پیشنهاد کرده‌اند که بدین ترتیب تعداد ویژگی‌های مورد نظر کاهش یافته و موجب سهولت کار و کاهش هزینه‌های ارزیابی کیفیت خاک می‌شود (Rezaei Andrews et al., 2002a; Govaerts et al., 2006).

به دلیل این که تفسیر تعداد زیادی از متغیر و نتیجه-گیری از آنها بسیار مشکل است، توصیه شده که مجموعه متغیرها در یک شاخص تلفیق گردند. این عمل از طریق جمع یا ضرب داده‌ها با یکدیگر و اعمال وزن مناسب برای هر متغیر صورت می‌گیرد. امروزه شاخص‌های کمی زیادی مانند شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره برای محاسبه شاخص کیفیت خاک ابداع گردیده است. برای محاسبه شاخص کیفیت تجمعی، با استفاده از توابع امتیازدهی استاندارد، برای هر مشخصه یک امتیاز تعیین شده و از مجموع حاصل ضرب امتیاز هر مشخصه در ضریب وزنی آن، مقدار شاخص محاسبه می‌شود (Doran and Parkin, 1994). همچنین شاخص کیفیت نمره بر اساس میانگین و حداقل ویژگی‌ها محاسبه می‌شود و وزن ویژگی‌های خاک دخالتی ندارد (Qin and Han and Wu, 1994; Zhao, 2000). Qi et al. (2009)، کیفیت خاک را بر مبنای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره در دو مجموعه

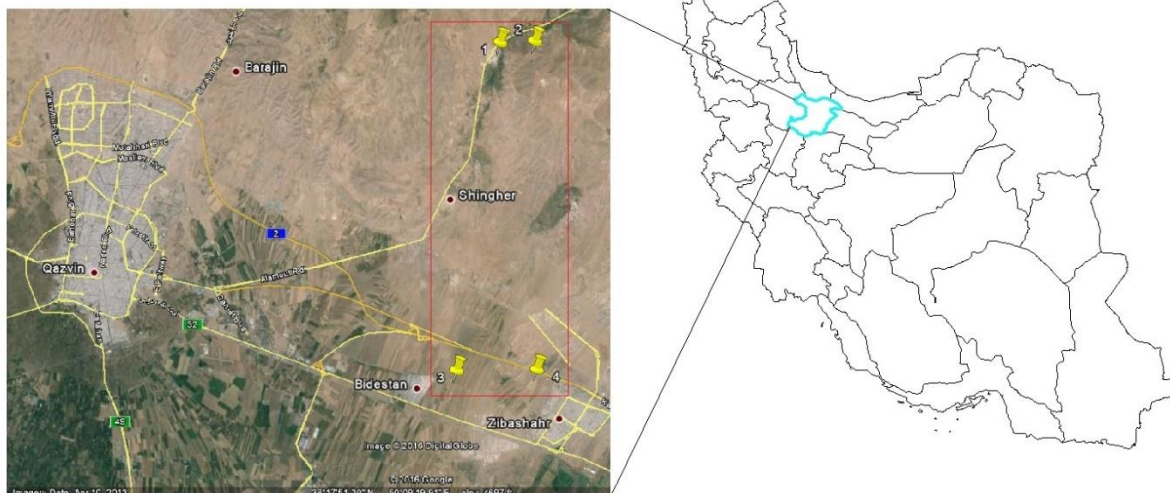
کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل در ۴۳۱ نمونه در مقیاس منطقه‌ای بررسی نمودند. محققانی در داخل کشور از جمله Shahab et al. (2013)، Ghaemi et al. (2012 و 2011) از شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره استفاده نموده‌اند. Shahab et al. (2011) برای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره رابطه این دو مجموعه را بررسی نمودند و به ترتیب ضریب همبستگی ۰/۶۲ و ۰/۵۶ به دست آوردند ولی Ghaemi et al. (2013) به ترتیب ضریب همبستگی ۰/۸۸ و ۰/۸۱ به دست آوردند. Rahmanipour et al. (2013) کیفیت خاک را با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی و تغییرات مکانی آن در بخشی از نواحی کشاورزی استان قزوین ارزیابی نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که نقشه کیفیت خاک حاصل از شاخص کیفیت تجمعی با روند موجود در منطقه (شامل وضعیت شوری، تراکم مراکز صنعتی و ...) همخوانی دارد و بیشتر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از این شاخص دارای کیفیت خاک متوسط می‌باشند.

در این پژوهش کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف در بخشی از اراضی جنوب شرق قزوین به وسیله دو شاخص کیفیت تجمعی و کیفیت نمره به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دسته حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک تعیین گردید و کارائی آن جهت محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک با مجموعه کل ویژگی‌ها مورد مقایسه قرار گرفت و در نهایت تاثیر نوع کاربری زمین بر شاخص‌های کیفیت تجمعی و کیفیت نمره مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

الف) منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در اراضی جنوب شرق قزوین در محدوده $8^{\circ} 17' 11''$ تا $50^{\circ} 17' 11''$ طول جغرافیایی و $36^{\circ} 14' 24''$ تا $51^{\circ} 4' 20''$ عرض جغرافیایی، در پنج کاربری باغ، مرتع، زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده و در سه کلاس شیب کمتر از ۲ درصد، ۷-۵ درصد و ۱۱-۹ درصد انجام شد (شکل ۱). کاربری باغ شامل باغات گردو (با بیش از ۲۰ سال سابقه کشت)، زراعت آبی و دیم تحت کشت گندم (با بیش از ۲۰ سال سابقه کشت)، مرتع با پوشش گیاهی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بودند و همچنین اراضی رها شده قبلاً تحت کشت دیم بوده و در زمان نمونه‌برداری حداقل ۸-۷ سال به صورت رها شده در آمده بودند. اقلیم منطقه مورد مطالعه سرد و نیمه مرطوب بوده و میزان بارندگی سالانه آن، بر اساس آمار ایستگاه زیاران $369/3$ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در اراضی جنوب شرق قزوین

مستقیم بر کیفیت خاک اثر داشته باشند (Wang and Gong, 1998). در این پژوهش ۱۷ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک که در منابع مختلف به عنوان ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک معرفی شده‌اند (Qi et al., 2009)، به عنوان مجموعه کل داده‌ها در نظر گرفته شدند.

برای انتخاب دسته حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک، از میان مجموعه کل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک، از روش تجزیه مولفه‌های اصلی استفاده گردید (Doran and Parkin, 1994). تعداد مولفه‌های استخراج شده در هر مدل برابر است با تعداد متغیرهایی که بررسی می‌شوند. اما می‌توان تعداد مشخصی از این مولفه‌ها را انتخاب نمود. معمولاً دو یا سه مولفه اول مقدار قابل توجهی از پراکندگی داده‌ها را در نظر می‌گیرد و دارای ارزش ویژه (Eigen values) بزرگتر یا مساوی یک هستند. بنابراین انتخاب دو یا سه مولفه اول برای ادامه کار کفایت می‌کند.

در ادامه مطابق با روش ارائه شده توسط Andrews et al (2002a) و Govaerts et al (2006)، دسته داده‌های حداقلی را انتخاب می‌نمائیم. در این روش، بعد از انتخاب تعداد مولفه‌های اصلی مهم‌ترین متغیرها در داخل هر مولفه اصلی انتخاب می‌گردد. به این صورت است که بین هر متغیر (صفت اندازه‌گیری شده) با مولفه‌های اصلی انتخاب شده یک همبستگی برقرار می‌گردد و به آن میزان اشتراک پذیری گفته می‌شود. هرچه همبستگی بالا باشد به عنوان متغیر اصلی در داخل آن مولفه اصلی در نظر گرفته می‌شود. معمولاً اشتراک پذیری بالای ۰/۵ یا متغیرهایی که تا ده درصد بزرگترین اشتراک پذیری (قدر مطلق آن) را داشته باشند (متغیرهای با وزن در محدوده

ب) نمونه‌برداری و اقدامات آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک در هر کاربری و هر شیب در سه تکرار و در مجموع ۴۵ نمونه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر تهیه شد. به همین تعداد نمونه‌های دست نخورده (جهت اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) و نمونه‌های زیستی (جهت اندازه‌گیری خصوصیات زیستی خاک) تهیه شد.

در این مطالعه ۱۷ خصوصیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند که عبارتند از: هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار ثابت (Klute and Dirksen, 1986)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از الک تر (Kemper and Rosenau, 1986)، بافت خاک (Gee and Blake and Hart age, 1986)، جرم مخصوص ظاهری (Bauder, 1986)، آب قابل استفاده گیاه (Klute and Dirksen, 1986)، کربن آلی (Nelson and Sommers, 1986)، واکنش خاک (Page et al., 1982) و هدایت الکتریکی (Page et al., 1982) در عصاره گل اشباع، فسفر قابل جذب (Olsen and Sommers, 1982)، پتاسیم قابل استفاده (Page et al., 1982)، کربنات کلسیم معادل (Page et al., 1982)، شدت تنفس میکروبی (Anderson, 1982)، جمعیت میکروبی (Alexander, 1982)، کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی (Jenkinson et al., 2004).

ج) انتخاب، امتیازدهی و وزن‌دهی ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک

انتخاب ویژگی‌هایی از خاک که به بهترین شکل نشان دهنده وضعیت کیفیت خاک باشند، اهمیتی کلیدی در ارزیابی کیفیت خاک دارد. ویژگی‌های انتخاب شده باید محدوده‌ی گسترده‌ای از مشخصات خاک را پوشش دهند و با این حال هر یک به طور

در هر نمونه خاک در قالب روابط آماری و ریاضی، شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمو محاسبه شدند، البته با این تفاوت که برای محاسبه شاخص کیفیت نمو وزن‌دهی لازم نیست. مطابق رابطه (۱) شاخص کیفیت تجمعی از مجموع حاصل ضرب امتیاز هر ویژگی در ضریب وزنی آن، محاسبه شد.

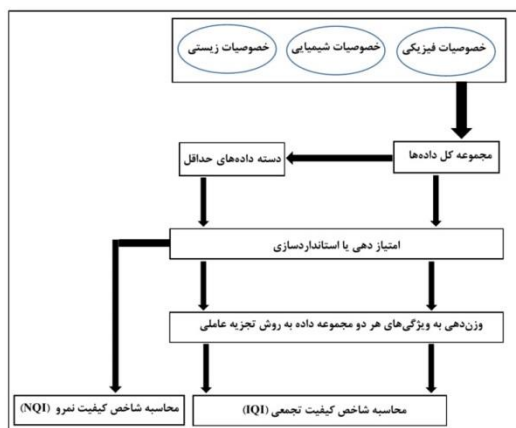
$$IQI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه W_i وزن هر ویژگی، N_i مقدار نمره یا امتیاز تعلق یافته به هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌های خاک می‌باشد. همچنین مطابق رابطه (۲)، شاخص کیفیت نمو بر اساس مقادیر میانگین و حداقل امتیاز ویژگی‌ها محاسبه شد.

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2} \times \frac{n-1}{n}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این معادله P_{ave} میانگین امتیاز تعلق یافته به ویژگی-های انتخاب شده در هر نمونه خاک، P_{min} حداقل امتیاز موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی-های مورد نظر است.

در نتیجه برای هر نمونه خاک در هر کاربری و درصد شیب، مقدار کمی کیفیت خاک با استفاده از دو شاخص کیفیت تجمعی و کیفیت نمو در دو مجموعه کل داده‌ها و دسته داده-های حداقل محاسبه شد. برای مقایسه هر یک از شاخص‌ها در کاربری‌ها و درصد شیب‌های مختلف، با استفاده از آزمون آماری دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسات میانگین انجام شد. همچنین به منظور تعیین کارایی دسته حداقل ویژگی‌های معرفی شده، همبستگی بین شاخص‌های به دست آمده با استفاده از مجموعه ویژگی‌های کل با شاخص‌های به دست آمده با استفاده از دسته ویژگی‌های حداقل در کل منطقه مورد مطالعه، بررسی شد. در نهایت کلیه مراحل فوق را در قالب یک فلوجارت می‌توان به طور خلاصه نمایش داد (شکل ۲).



شکل ۲- فلوجارت مراحل انتخاب، امتیازدهی و وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و محاسبه شاخص کیفیت خاک

۱۰ درصد بیشترین وزن موجود در آن مولفه اصلی)، به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته می‌شوند و از این متغیرهای انتخاب شده به عنوان حداقل مجموعه داده استفاده می‌شود.

با توجه به این که ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی بوده و قابل جمع یا ضرب نمودن نیستند، برای تجمیع آن‌ها در قالب یک شاخص کلی، باید بی واحد گردند. جهت انجام این امر از رتبه‌دهی یا استانداردسازی داده‌ها به وسیله توابع امتیازدهی استاندارد (Function Standard Scoring) استفاده شد بر اساس این روش ویژگی‌های مختلف خاک از سه تابع پیروی می‌کنند؛ ۱- تابع هر چه بیشتر بهتر، که برای خصوصیات خاک از خاک به کار می‌رود که افزایش آن موجب بهبود کیفیت خاک شود (مانند کربن آلی)، ۲- تابع هر چه کمتر بهتر، که برای خصوصیات خاک از خاک به کار می‌رود که افزایش آن موجب تنزل کیفیت خاک شود (مانند جرم مخصوص ظاهری) و ۳- تابع سطح بهینه، در مورد خواصی از خاک استفاده می‌شود که افزایش یا کاهش آنها تا حد معینی باعث بهبود کیفیت خاک می‌گردد و افزایش یا کاهش آنها بیش از حد بهینه، موجب کاهش کیفیت خاک می‌شود (مانند واکنش خاک). بدین ترتیب، محدوده مقادیر هر ویژگی در هر دو مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل با توابع استاندارد امتیازدهی شدند (Andrews et al., 2002b) و با توجه به اینکه ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی می‌باشند، برای ارائه آنها در قالب یک مقدار کلی، باید آنها را بی بعد نمود. به این ترتیب که محدوده‌ای از مقادیر ویژگی موردنظر که از نظر کیفیت خاک مطلوب‌ترین مقدار می‌باشد مقدار یک و محدوده‌ای که کم‌ترین کیفیت را دارد مقدار صفر به آن تعلق می‌گیرد. به این ترتیب تابعی به دست می‌آید که با استفاده از آن، مقادیر ویژگی موردنظر بین صفر (کم‌ترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و ۱ (بیش‌ترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره‌دهی می‌شود (Qi et al., 2009; Marzaioli et al., 2010).

همچنین جهت وزن‌دهی ویژگی‌های مؤثر در هر دو مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل، سهم هر ویژگی (Communality) به روش تجزیه عاملی (Factor analysis) به کمک نرم افزار SPSS محاسبه شد (Sun; Shukla et al., 2006). بدین منظور نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، به عنوان وزن هر ویژگی در نظر گرفته شد (Qi et al., 2009).

د) محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک

در نهایت با تلفیق امتیازات و وزن مربوط به ویژگی‌های مختلف

نتایج و بحث

تجزیه به مولفه اصلی: به طور کلی کاربرد عمده روش تجزیه مولفه‌های اصلی عبارت است از کاهش تعداد متغیرها و یافتن ساختار ارتباطی بین متغیرها که درحقیقت همان دسته‌بندی متغیرها است. بر همین اساس از این روش برای انتخاب دسته داده‌های حداقل از میان ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی مورد مطالعه استفاده شد. مطابق جدول ۱، سه مولفه اصلی ابتدائی با ارزش ویژه بزرگتر از یک که در مجموع ۸۹/۴۵ درصد از واریانس کل را تحت پوشش قرار می‌دهند، استخراج شدند.

در مولفه اصلی اول، نیتروژن زیتوده میکروبی بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، متغیرهایی از قبیل کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع، آب قابل استفاده گیاه، شدت تنفس میکروبی و کربن زیتوده میکروبی بیشترین وزن را داشتند. سپس با استفاده ضریب همبستگی، از میان متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با همدیگر دارند، متغیری که وزن بیشتری را دارد، انتخاب شد و بقیه حذف گردیدند. بین کربن و

نیتروژن زیتوده میکروبی ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹۷ برقرار است، بنابراین کربن زیتوده میکروبی، حذف و از نیتروژن زیتوده میکروبی برای قرارگیری در دسته داده‌های حداقل استفاده شد. برای بقیه پارامترها نیز به همین شکل عمل شد و در نهایت در این مولفه اصلی متغیرهای نیتروژن زیتوده میکروبی، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع و آب قابل استفاده برای درج در دسته داده‌های حداقل انتخاب شدند. در مولفه اصلی دوم، شن بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن آن، واکنش خاک نیز به عنوان عضوی از دسته داده‌های حداقل انتخاب شد و چون همبستگی شن و واکنش خاک ضعیف است (۰/۷۷) بنابراین هر دو به عنوان دسته داده‌های حداقل انتخاب گردیدند. در مولفه اصلی سوم، هدایت الکتریکی تنها متغیری است که به عنوان عضوی از دسته داده‌های حداقل انتخاب می‌گردد. بنابراین در کل هفت ویژگی نیتروژن زیتوده میکروبی، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع، آب قابل استفاده گیاه، میزان شن، واکنش خاک و هدایت الکتریکی به عنوان دسته داده‌های حداقل انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- انتخاب دسته داده‌های حداقل با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی

مولفه‌های اصلی			تجزیه و تحلیل آماری
۳	۲	۱	
۱/۰۲۸	۳/۷۹۷	۱۰/۳۸۲	ارزش ویژه
۶/۰۴	۲۲/۳۳	۶۱/۰۷	واریانس
۸۹/۴۵	۸۳/۴۰	۶۱/۰۷	واریانس جمعی
بردارهای ویژه (Eigenvectors)			
-۰/۱۵۶	-۰/۰۴۴	۰/۹۷۷	کربن آلی
۲/۴۴	۰/۸۴۶	-۰/۲۱۸	واکنش خاک
۰/۵۱۲	۰/۶۹۵	۰/۰۸۹	هدایت الکتریکی
۰/۳۹۳	۰/۰۷۷	۰/۸۷۵	فسفر قابل جذب
-۰/۴۱۷	۰/۶۷۸	۰/۵۴۱	پتاسیم قابل استفاده
-۰/۰۱۷	۰/۳۰۲	-۰/۸۳۳	کربنات کلسیم
۰/۱۶۲	-۰/۸۹۶	۰/۳۱۶	شن
-۰/۴۴۲	۰/۶۳۹	-۰/۵۳۳	سیلت
۰/۲۵۴	۰/۶۷۷	-۰/۰۵۹	رس
-۰/۰۱۰	-۰/۲۹۳	-۰/۹۲۸	جرم مخصوص ظاهری
-۰/۱۷۷	۰/۱۸۹	۰/۹۵۷	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
-۰/۱۶۸	۰/۰۹۶	۰/۹۷۰	هدایت هیدرولیکی اشباع
۰/۰۰۳	-۰/۰۱۱	۰/۹۸۱	آب قابل استفاده
۰/۰۵۸	۰/۲۸۰	۰/۹۳۰	شدت تنفس میکروبی
-۰/۰۲۴	۰/۰۷۹	۰/۹۸۴	کربن زیتوده میکروبی
-۰/۰۰۹	۰/۱۰۰	۰/۹۸۵	نیتروژن زیتوده میکروبی
۰/۰۶۲	-۰/۳۷۷	۰/۸۶۶	جمعیت میکروبی

وزن دهی و ویژگی‌ها: سپس واریانس مشترک یا سهم هر ویژگی به وسیله روش تجزیه عاملی در دو مجموعه کل ویژگی - های موثر بر کیفیت خاک و حداقل ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک محاسبه و با تعیین نسبت واریانس مشترک هر ویژگی به مجموع واریانس مشترک کل ویژگی‌ها، وزن هر ویژگی محاسبه

گردید (جدول ۲).

محاسبه شاخص کیفیت خاک: در مرحله بعد، شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره برای هر کاربری و در سه کلاس شیب تعیین گردیدند (جدول ۳).

جدول ۲- واریانس مشترک و وزن ویژگی‌ها در مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل

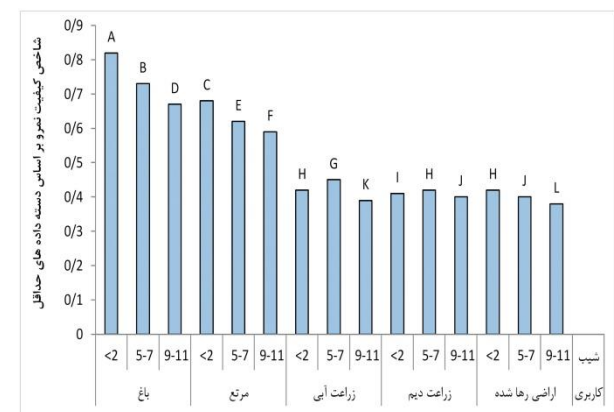
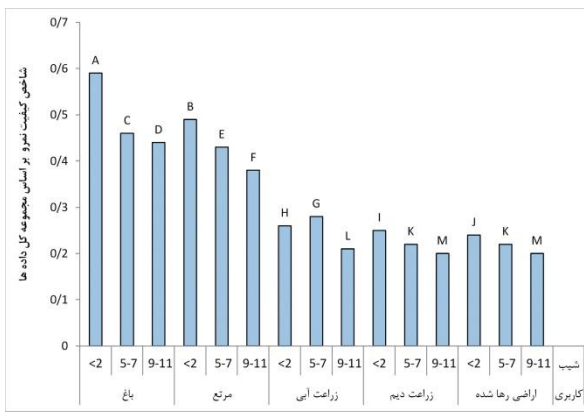
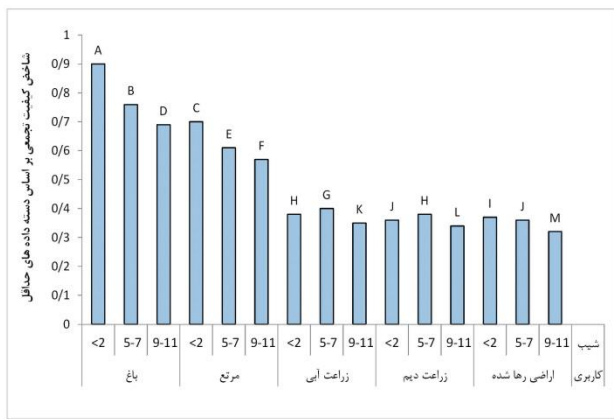
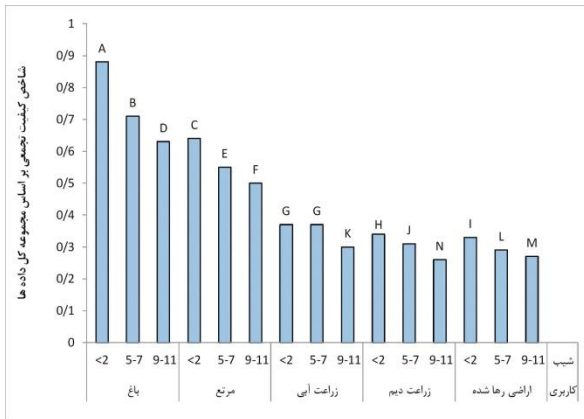
دسته داده‌های حداقل		مجموعه کل داده‌ها		پارامترها
وزن	واریانس مشترک	وزن	واریانس مشترک	
۰/۱۵۷	۰/۹۷۴	۰/۰۶۴۵	۰/۹۸۱	کربن آلی
۰/۱۴۳	۰/۸۸۴	۰/۰۵۴۱	۰/۸۲۲	واکنش خاک
۰/۱۱۰	۰/۶۸۳	۰/۰۴۹۶	۰/۷۵۴	هدایت الکتریکی
		۰/۰۶۰۹	۰/۹۲۶	فسفر قابل جذب
		۰/۰۶۰۹	۰/۹۲۶	پتاسیم قابل استفاده
		۰/۰۵۱۷	۰/۷۸۶	کربنات کلسیم
۰/۱۲۰	۰/۷۴۳	۰/۰۶۱۱	۰/۹۲۹	شن
		۰/۰۵۸۴	۰/۸۸۸	سیلت
		۰/۰۳۴۷	۰/۵۲۷	رس
		۰/۰۶۲۳	۰/۹۴۸	جرم مخصوص ظاهری
		۰/۰۶۴۶	۰/۹۸۳	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
۰/۱۵۵	۰/۹۶۰	۰/۰۶۴۳	۰/۹۷۷	هدایت هیدرولیکی اشباع
۰/۱۵۵	۰/۹۶۱	۰/۰۶۳۳	۰/۹۶۲	آب قابل استفاده
		۰/۰۶۲۲	۰/۹۴۶	شدت تنفس میکروبی
		۰/۰۶۴۱	۰/۹۷۵	کربن زیتوده میکروبی
۰/۱۵۹	۰/۹۸۴	۰/۰۶۴۵	۰/۹۸۱	نیترژن زیتوده میکروبی
		۰/۰۵۸۹	۰/۸۹۵	جمعیت میکروبی

جدول ۳- کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف بر مبنای دو شاخص و مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل

شاخص کاربری	کیفیت تجمعی		کیفیت نمره	
	کلاس شیب (%)	مجموعه کل داده‌ها	دسته داده‌های حداقل	مجموعه کل داده‌ها
باغ	<۲	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۵۱
	۵-۷	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۳۹
	۹-۱۱	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۴۰
مرتع	<۲	۰/۶۴	۰/۷۰	۰/۵۶
	۵-۷	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۴۴
	۹-۱۱	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۴۳
زراعت آبی	<۲	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۲۴
	۵-۷	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۲۷
	۹-۱۱	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۱۸
زراعت دیم	<۲	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۲۴
	۵-۷	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۲۶
	۹-۱۱	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۲۳
اراضی رها شده	<۲	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۲۷
	۵-۷	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۲۵
	۹-۱۱	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۲۱
کل منطقه		۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۳۲۶

کاهش می‌یابد. کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده دارای کمترین کیفیت خاک هستند و تفاوت معنی داری با دو کاربری باغ و مرتع دارند. همچنین با افزایش درصد شیب کیفیت خاک در این سه کاربری نیز کاهش می‌یابد (شکل ۳).

نتایج بدست آمده (جدول ۳ و شکل ۳) نشان می‌دهد که کاربری باغ بیشترین مقدار شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمودار را در هر دو مجموعه داده به خود اختصاص می‌دهد و پس از آن کاربری مرتع قرار می‌گیرد و دارای کیفیت نسبتاً زیادی می‌باشد، که البته با افزایش درصد شیب این مقدار



شکل ۳- مقایسه آماری کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف بر مبنای دو شاخص و مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل

دیم و اراضی رها شده افزایش داد. در کاربری‌های زراعت آبی و دیم، کشت فشرده و برنگرداندن بقایای گیاهی به خاک سبب کاهش مقدار پوشش بقایای سطحی شده و از کیفیت و کمیت کربن آلی خاک و به تبع آن کیفیت خاک کاسته است (Lal et al., 1997). در این زمینه Emami et al (۲۰۱۴) نشان دادند که بدون افزودن ماده آلی و در تیمار شاهد کیفیت خاک در پایین‌ترین سطح قرار داشت و در کلاس ۴ دسته بندی شد اما با افزودن مواد آلی مختلف، کلاس کیفیت خاک یک تا دو درجه ارتقا یافت.

همچنین تفاوت حاصل از مقادیر برآورد کیفیت خاک توسط دو شاخص، بین دو مجموعه کل و دسته حداقل داده‌ها نشان می‌دهد که مجموعه کل داده‌ها دقت و صحت بیشتری نسبت به دسته داده‌های حداقل دارد (جدول ۳ و شکل ۳)، که

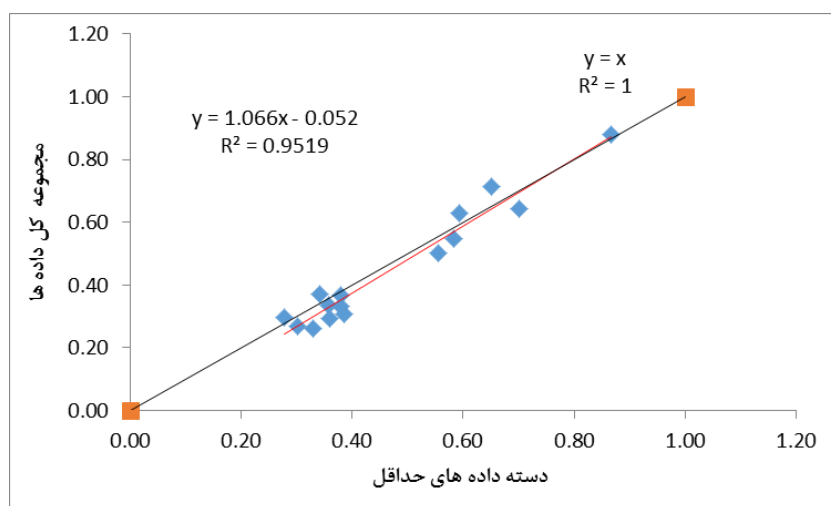
لذا در کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده لازم است عملیات مدیریتی مناسب به منظور افزایش کیفیت خاک اجرا گردد تا ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک به ویژه خصوصیات انتخاب شده به عنوان دسته داده‌های حداقل که بیشترین تاثیر را بر شاخص‌های کیفیت خاک دارند، را به محدوده بهینه‌شان نزدیک کند. از میان هفت ویژگی نیتروژن زیتوده میکروبی، کربن آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع، آب قابل استفاده، میزان شن، واکنش خاک و هدایت الکتریکی انتخاب شده به عنوان دسته داده‌های حداقل، کربن آلی خاک عاملی است که اکثر خصوصیات خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بنابراین با اتخاذ اقدامات مدیریتی جهت افزایش کربن آلی خاک می‌توان سایر ویژگی‌ها را نیز به حد بهینه سوق داد و بدین جهت میزان کیفیت خاک را در کاربری‌های زراعت آبی، زراعت

زیادی این وضعیت را تأیید می‌کنند. Shahab *et al* (2012) در جنوب مشهد، Rahmanipour *et al* (2014)، Qi *et al* (2009) و بسیاری از محققان دیگر نیز به این نتیجه رسیدند که مقدار شاخص کیفیت خاک نمره در کلیه شرایط نسبت به شاخص تجمعی کیفیت خاک کمتر است.

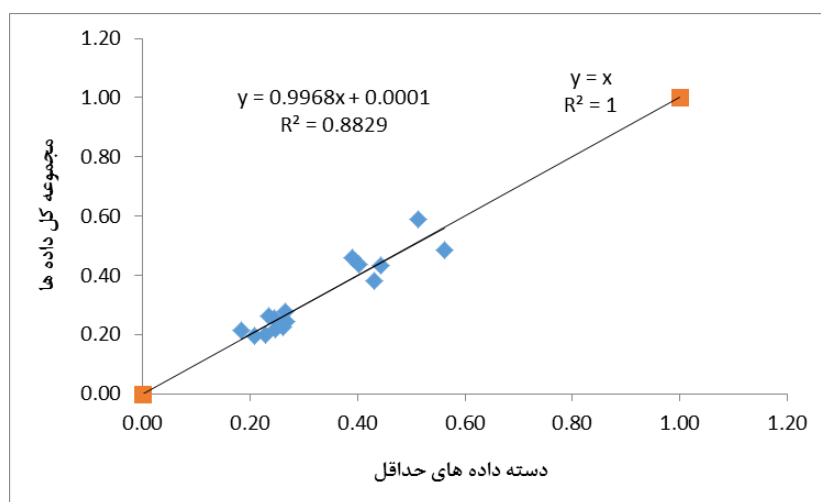
سوال دیگر در این پژوهش این است که آیا می‌توان برای تعیین کیفیت خاک، به جای مجموعه کل داده‌ها از دسته داده‌های حداقل استفاده نمود. برای پاسخ به این سوال باید رابطه بین این دو مجموعه بررسی شود. شکل ۴ و ۵ به ترتیب رابطه بین مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل در شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره برای کل منطقه را نشان می‌دهد.

این امر به دلیل وجود ویژگی‌های بیشتر در محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک است. Doran and Parkin (1994) نیز شاخص کیفیت تجمعی در مجموعه کل داده‌ها را به عنوان جامع‌ترین و بهترین ترکیب برای ارزیابی کیفیت خاک معرفی نمودند، اما با این وجود استفاده از دسته داده‌های حداقل موجب کاهش حجم کار و هزینه‌های مربوط به آن همراه با دقت مناسب می‌شود.

در حالت مقایسه بین دو روش "شاخص تجمعی کیفیت خاک" و "شاخص کیفیت خاک نمره" می‌توان مشاهده نمود که مقدار عددی شاخص کیفیت خاک نمره در هر دو مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل، نسبت به شاخص تجمعی کیفیت خاک کمتر است و معمولاً مقدار عددی آن کمتر از ۰/۵ می‌باشد. البته این امر طبیعی به نظر می‌رسد و نتایج تحقیقات



شکل ۴- رابطه خطی مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل برای تعیین شاخص کیفیت تجمعی



شکل ۵- رابطه خطی مجموعه کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل برای تعیین شاخص کیفیت نمره

۰/۹۵ است و برای شاخص کیفیت نمره ضریب تبیین رابطه بین این دو مجموعه ۰/۸۸ است که بیانگر رابطه خوب این دو

همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای شاخص کیفیت تجمعی در کل منطقه ضریب تبیین رابطه بین دو سری داده

زیرا این شاخص برای ویژگی‌های مورد بررسی، علاوه بر امتیاز-دهی، اوزانی نیز در نظر می‌گیرد در حالی که در شاخص کیفیت نمره تنها بر اساس مقادیر میانگین و حداقل امتیاز ویژگی‌ها محاسبه می‌شود (Qi et al., 2009).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که کاربری باغ و مرتع نسبت به کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رها شده دارای کیفیت خاک بیشتری هستند و هر دو شاخص در هر دو دسته داده‌ها، این امر را به وضوح نشان می‌دهند. بنابراین هر گونه مدیریت و کاربری که باعث افزایش دست‌خوردگی و کاهش پوشش گیاهی سطح خاک شود، موجب کاهش کیفیت خاک می‌گردد. همچنین هر دو شاخص مورد استفاده جهت برآورد کیفیت خاک به ویژه شاخص کیفیت تجمعی، برای ارزیابی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف اراضی از کارایی خوبی برخوردار هستند و این امر به وسیله دو مجموعه داده اثبات گردید. با توجه به ضرایب تبیین بدست آمده بین دو مجموعه داده برای هر دو شاخص، استفاده از دسته داده‌های حداقل به عنوان راهکاری قابل اطمینان، سریع و مناسب از لحاظ اقتصادی برای انتخاب حداقل ویژگی‌های موثر خاک در منطقه مورد مطالعه می‌تواند مفید باشد. کاربرد این روش، اثر تکرارپذیری حاصل از ویژگی‌های با همبستگی مشابه را کاهش می‌دهد و می‌تواند اطلاعات موجود در سایر پارامترها را به عنوان مجموعه منتخب نشان دهد.

مجموعه برای هر دو شاخص به ویژه شاخص کیفیت تجمعی است. همچنین بیانگر کارایی بهتر شاخص کیفیت تجمعی برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه است. بنابراین می‌توان به جای اندازه‌گیری مجموعه کل خصوصیات اندازه‌گیری شده در این منطقه مطالعاتی، از دسته داده‌های حداقل استفاده نمود و با ضریب اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۸۸ به همان نتایج دست یافت. بنابراین با استفاده از شاخص‌های کیفیت خاک حاصل از دسته ویژگی‌های حداقل، با اطمینان قابل قبولی می‌توان کیفیت خاک را ارزیابی نمود. در نظر گرفتن دسته داده‌های حداقل (هفت ویژگی) نسبت به مجموعه کل داده‌ها (۱۷ ویژگی)، موجب صرفه‌جویی در هزینه و زمان مورد نیاز برای تعیین کیفیت خاک می‌شود. (Shahab et al. 2011) در زمین‌های کشاورزی و مرتعی جنوب مشهد، برای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمره رابطه این دو مجموعه را بررسی نمودند و به ترتیب ضریب تبیین ۰/۶۲ و ۰/۵۶ به دست آوردند. همچنین Qi et al (2009) به ترتیب ضریب تبیین ۰/۶۵ و ۰/۵۷، Ghaemi et al (2013) به ترتیب ضریب تبیین ۰/۸۸ و ۰/۸۱ به دست آوردند در حالی که نتایج Rahmanipour et al (2014) در زمین‌های کشاورزی قزوین، به ترتیب ضریب تبیین ۰/۳۴ و ۰/۲۳ را نشان می‌دهد. بنابراین یافته‌های اکثر این محققین نیز نشان می‌دهد که اولاً رابطه خوبی بین این دو سری داده وجود دارد و می‌توان به جای مجموعه کل داده‌ها از دسته داده‌های حداقل برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده نمود. ثانیاً شاخص کیفیت تجمعی نسبت به شاخص کیفیت نمره، ارزیابی دقیق‌تری از کیفیت خاک دارد.

REFERENCES

- Alexander, M. 1982. Most probable number method for microbial populations. In: Page AL., Miller RH., Keeney DR. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part2. Amer. Soc. for Agron, Madison USA: 815–820.
- Anderson, E., & John, P. 1982. Soil respiration. Methods of Soil Analysis Part2. Amer. Soc. for Agron, Madison USA: 831–870.
- Andrews, S.S., Karlen, D.L., Mitchell, J.P., 2002a. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agric. Ecosyst. Environ. 90, 25–45.
- Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, K.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., Munk, D.S., 2002b. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. Agron. J. 94, 12–23.
- Aparicio, V., and Costa, J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean pampas. Soil and Tillage Research, 96: 155-165.
- Blake GR., Hart age KH, 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part1: physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. Agronomy Monograph. 9: 363–382.
- Bone, J., Barraclough, D., Eggleton, P., Head, M., Jones, D., Voulvoulis, N. 2012. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data. Land Degradation & Development.
- Brejda JJ., Moorman TB., Karlan DL. And Dao TH. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains, Soil Sci. Soc. Am. J. 64:2115-2124.
- Doran, J.W. and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart (ed.) Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Science Society of America Special Publication no. 35, Madison, WI.
- Doran, J.W., and A.J. Jones, (Eds.), 1996. Methods for Assessing Soil Quality. Soil Science Society of America Special Publication, vol. 49. Soil Science Society of America, Madison, WI.

- Emami, H., Astaraei, A.R., Fotovat, A. 2014. Evaluating The Effect of Organic Matter on Soil Quality Score Functions. *Journal of Water and Soil*. Vol. 28, No.3: 565-574. (In Farsi).
- Gee G.W., and Bauder J.M. 1986. Partial-size analysis. In *Methods of Soil Analysis, Part 1, physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph No. 9 (2nd edition), American Society of Agronomy, Madison, WI. Pp 383-411.
- Ghaemi, M., Astaraei, A.R., Sanaei nezhad, S.H., Nasiri mahalati, M., Emami, H. 2013. Evaluating Chemical Quality of Several soil cultivation wheat-corn Using of soil quality Models at some Parts of Southeast Mashhad area. *Soil Reserch*. Vol. 27, No.4: 463-473. (In Farsi).
- Govaerts, B., K.D. Sayre, and J. Deckers, 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research*, 87:163-174.
- Han, W.J., Wu, Q.T., 1994. A primary approach on the quantitative assessment of soil quality. *Chinese J. Soil Sci.* 25, 245-247 (In Chinese with English Abstract).
- Jenkinson, D.S., Brookes, P.C. & Powelson, D.S. 2004. Measuring soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. (36):5-7.
- Karlen, D.L., Andrews, S.S., Wienhold, B.J., Zobeck, T.M. 2008. Soil quality assessment: Past, present and future. *Electronic Journal of Integrative Biosciences* 6: 3-14.
- Karlen, D.L., Gardner, J.C., Rosek, M.J., 1998. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. *Journal of Production Agriculture* 11, 56 - 60.
- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part a: physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp 425-442.
- Klute, A., & Dirksen, C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods of Soil Analysis: Part 1—physical and Mineralogical Methods (methodsofsoilan1)*: 687-734.
- Lal R., Kimble J. and Follett R.F. 1997. Pedospheric processes and the carbon cycle. p. 1-8. In: Lal, R., W.H. Blum, C.Valentine, B.A. (eds.) *Stewart. Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press, Boca Raton.
- Marzaioli, R., D'Ascoli, R., De Pascale, R.A., Rutigliano, F.A. 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44(3), 205-212.
- Nelson BW and Sommers LE, 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp:539 - 577. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (Eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. Soil Sci Soc of Am, Madison WI.
- Olsen, S.R., & Sommers, L. 1982. phosphorus. In: AL. Page: *Methods of soil analysis*, Agron. No. 9, Part2: Chemical and microbiological properties, (ed.) Am. Soc.Agron., Madison, WI, USA.: 403-430.
- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4), 325-334.
- Qin, M.Z., Zhao, J., 2000. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: a case study of Kaifeng. *Acta Geogr. Sin.* 55, 545-554 (In Chinese with English abstract).
- Rahmanipour, F., Bahrami, H.A., Bandarabadi, S.R., Fereidouni, Z. 2013. Quantitative soil quality assessment and its spatial distribution at some Parts of agricultural lands in Qazvin Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 43(1), 1-8. (In Farsi).
- Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H.A., Fereidouni, Z., Bandarabadi, S.R. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40(0), 19-26.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., Yang, X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3-4), 252-263.
- Rezaei SA, Gilkes RJ, Andrews SS. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma* 136: 229-234.
- Shahab, H., Emami, H., Haghnia, Gh. 2012. Evaluating the relationship between the Models to determine soil quality and sustainable indices in agricultural and range lands of southern Mashhad area. . *Soil Reserch*. Vol. 26, No.3: 227-234. (In Farsi).
- Shahab, H., Emami, H., Haghnia, Gh., Karimi, A. 2011. Determination the Optimal Range of Pore Volume Distribution by Using of Soil Physical Quality Indicators and Effect of Soil Properties on Sgi Index. *Journal of Water and Soil*. Vol. 25, No.4: 881-891. (In Farsi).
- Shukla M.K., Lal R., and Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Res.* 87: 194-204.
- Sun B., Zhou S.L., and Zhao Q.G. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115: 85-99.
- Wang, X., Gong, Z. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 81(3-4), 339-355.

