دانشکده کشاورزی

گروه علوم و مهندسی خاک

کیفیت خاک؛ مفاهیم، شاخص ها و ارزیابی

پاییز ۱۳۹۹

۱-۳- تعریف کیفیت خاک

تعاریف اولیه کیفیت خاک بیشتر به بحث حاصلخیزی و قابلیت تولیدی خاک مربوط می‌شد، اما تعاریف معاصر، کیفیت خاک را معادل پایداری، کیفیت زیست محیطی، تغییرات جهانی آب و هوا و حاصلخیزی خاک می‌دانند. در ادامه به برخی از این تعریفات کیفیت خاک اشاره می‌گردد:

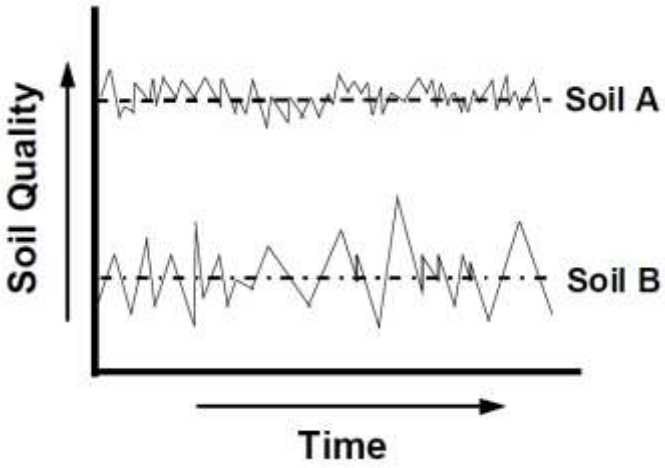
تعریف ساده اولیه برای کیفیت خاک عبارت بود از "ظرفیت خاک برای کارکرد." تعریف گسترش یافته کیفیت خاک عبارت است از: ظرفیت یک نوع خاصی از خاک برای عملکرد، در داخل محدوده‌های زیست‌بوم‌های طبیعی یا تحت مدیریت انسان، برای تولیدات پایدار گیاهی و حیوانی، حفظ یا ارتقاء کیفیت آب و هوا و حمایت از سلامت و مسکن انسانی (کارلن و همکاران، ۱۹۹۷).

کیفیت خاک شاخص مهم پایداری در کشاورزی و محیط زیست محسوب می‌شود. دوران و پارکین(۱۹۹۴)، بر پایه اهداف کشاورزی پایدار و حفظ سلامت محیط زیست، کیفیت خاک را چنین تعریف می‌کند: توانایی دایم خاک به عنوان یک سامانه حیاتی زنده در داخل زیست‌بوم و تحت بهره‌برداری‌های متفاوت به ترتیبی که علاوه بر حفظ توان تولید زیستی، بتواند کیفیت آب و هوا را بهبود بخشد و همچنین تأمین کننده سلامت انسان، گیاه و حیوان باشد.

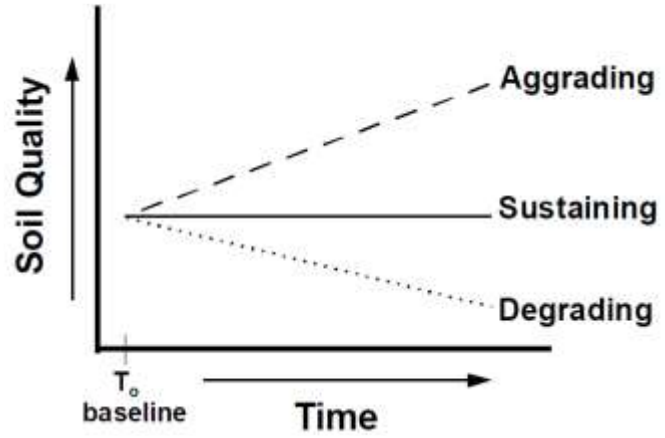
به گفته لارسون و پیرس (۱۹۹۱)، توابع و رفتارهایی که کیفیت خاک را مشخص می‌سازند عبارتند از توانایی خاک در؛ ۱) پذیرش، نگهداری و آزادسازی عناصر غذایی و سایر ترکیبات شیمیایی، ۲) پذیرش، نگهداری و آزادسازی آب مورد نیاز گیاهان، کاهش رواناب سطحی و تقویت آب زیرزمینی، ۳) تقویت و حفظ رشد ریشه، ۴) حفظ زیستگاه موجودات زنده خاک، و ۵) واکنش به عملیات مدیریتی و مقاومت در مقابل تخریب خاک. حفظ یا بهبود کیفیت خاک می‌تواند باعث ایجاد استمرار در باروری خاک، افزایش کارآیی عناصر غذایی و آفت‌کش‌ها، بهبود کیفیت آب و هوا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (بخش بررسی اقتصادی وزارت جهاد کشاورزی ایالات متحده، ۱۹۹۷)

کیفیت خاک را می توان از دو بُعد مورد مطالعه قرار داد. یکی کیفیت ذاتی خاک و دیگری کیفیت پویای خاک (کارلن و همکاران، ۱۹۹۷). بعد ذاتی کیفیت خاک تحت تاثیر عوامل خاک‌سازی که به‌وسیله ینی معرفی شده‌اند قرار می‌گیرند. این عوامل شامل اقلیم، مواد مادری، زمان، پستی و بلندی و پوشش گیاهی می‌باشند (شکل ۱-۳). بعد پویای خاک، خصوصیاتی از خاک است، که بسته به نوع مدیریت تغییر می‌کنند و بیانگر وضعیت سلامت خاک soil health می باشد (شکل ۱-۴). فرآیندهای طبیعی مانند فرسایش و خشک‌سالی و بعد پویای خاک که تحت تاثیر مدیریت‌های انسانی هستند، می‌توانند کیفیت ذاتی خاک را تغییر دهند. همچنین فعالیت‌های

انسانی می‌تواند به فرآیندهای خاک سرعت بخشیده و کیفیت خاک را کاهش و یا افزایش دهد. هر دو بخش کیفیت ذاتی و پویای خاک در تعیین کیفیت خاک بسیار مهم می‌باشند.



شکل ۱-۳- مفهوم کیفیت ذاتی خاک برای دو خاک مختلف (کارلن و همکاران، ۲۰۰۱)



شکل ۱-۴- مفهوم کیفیت پویایی خاک (کارلن و همکاران، ۲۰۰۱)

در اینجا لازم است که تفاوت بین مطالعات ارزیابی کیفیت خاک با اقدامات سنتی مطالعه، تفسیر و رده‌بندی خاک[1] روشن گردد؛ ارزیابی کیفیت خاک هم بر ویژگی‌های پویا و هم بر ویژگی‌های ذاتی خاک تاکید دارد، در حالی که تفسیر و رده‌بندی سنتی خاک تقریبا به طور کامل بر اساس ویژگی‌های ذاتی می باشد. این ویژگی‌های ذاتی از پروفیل خاک (با عمق تقریبا دو متر) به دست می‌آیند و قابلیت مطلق خاک‌های متنوع را تعیین می-کنند. در حالی که ویژگی‌های پویای خاک عموما بر عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری سطح خاک تمرکز دارند و شرایط مخصوص خاک را به تناسب اقدامات مدیریتی و کاربری اخیر نشان می‌دهند (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳).

[1]- soil survey

در این رابطه، شکل ۱-۳ بر تفاوت‌های بین خاک و مقایسه معنی‌داری که می‌تواند فقط با توجه به سری خاک‌ها در یک موقعیت معین و با یک تاریخچه مدیریتی شناخته شده انجام شود، تاکید دارد (کارلن و همکاران، ۲۰۰۸). مفهوم کیفیت ذاتی خاک با استفاده از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی متنوع که برخی از ویژگی‌های ذاتی (همانند pH، جرم مخصوص ظاهری و میزان مواد آلی) را در بر می‌گیرد و در تشریح پروفیل خاک به دست می‌آید، قابل اندازه‌گیری است. در واقع اندازه‌گیری‌های انجام شده برای ویژگی‌های ذاتی خاک در مطالعه سنتی خاک، برای تعیین محدوده‌های استقرار ویژگی‌های پویای خاک مرتبط با کیفیت خاک استفاده می‌شوند. بنابراین مطالعات، تفسیر و رده‌بندی سنتی خاک، مکمل ارزیابی کیفت خاک می‌باشد نه رقیب آن (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳). مقایسه بین خاک‌های مختلف به دلیل تفاوت در عوامل خاک‌سازی ذاتی بی‌مفهوم است. نوسانات موجود در هر دو خاک A و B تاثیرات پویا را منعکس می‌کند و نشان دهنده امکان وجود تفاوت زمانی در ارزیابی می‌باشد (کارلن و همکاران، ۲۰۰۸).

شکل ۱-۴ راجع به انتخاب خط پایه برای استفاده در ارزیابی کیفیت/سلامت خاک بحث می‌کند. از آنجایی که نمی‌شود در زمان به عقب برگشت، تکرار ارزیابی‌ها در طول زمان، برای آزمون تغییرات طولانی مدت یک خاک تحت مدیریت مشابه می‌تواند ابزار بسیار مفیدی باشد. مهم‌ترین خط پایه، شرایط یا کیفیت منابع خاکی به هنگامی است که اولین اندازه‌گیری‌ها انجام شد و در ادامه بسته به تصمیمات مدیریتی پاسخ ارزیابی تغییر می-یابد. اندازه‌گیری ها درطول زمان (اغلب سه یا پنج سال) نشان خواهد داد که اقدامات به کار رفته باعث افزایش، کاهش یا ثابت ماندن شاخص‌ها شده است (کارلن و همکاران، ۲۰۰۸).

۱-۵- ارزیابی کیفیت خاک

به خاطر اهمیت کیفیت خاک، ارزیابی کمی آن برای تعیین پایداری سیستم‌های مدیریت اراضی و کمک به سازمان‌های دولتی برای ایجاد کشاورزی پایدار و کاربری صحیح اراضی، ضروری است (دوران و پارکین، ۱۹۹۴). تحقیق در مورد کیفیت خاک متفاوت با مدیریت خاک است، زیرا کیفیت خاک شامل ویژگیهای مختلف خاک می‌باشد و لازم است به جنبه‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک به طور همزمان توجه شود (وندر و بالرو، ۱۹۹۹). با این وجود کیفیت خاک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و باید از شاخص‌های کیفیت خاک استنتاج شود. از دهه ۱۹۵۰ ویژگی‌ها یا رفتارهای مختلف خاک به عنوان شاخص‌های کیفی مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص‌های کیفیت خاک ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک هستند که ظرفیت خاک برای تولید محصول یا عملکرد زیست محیطی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و به تغییر کاربری اراضی، مدیریت یا عملیات حفاظتی حساس می‌باشند (بریجا و همکاران، ۲۰۰۰).

در مرکزیت تعریف معین از کیفیت خاک، توانایی خاک در انجام برخی از کارکردهای مهم، در مجلات شاخص کیفیت خاک گسترش یافته است. شاخص کیفیت خاک یک مقدار، یک ترکیب از اطلاعات گسترده در رابطه با خاک (ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی) است که نمراتی برای سازگاری انجام یک یا چند عملکرد محاسبه می‌کند (سازگاری کمتر باعث کمتر شدن ارزش شاخص کیفیت خاک می‌گردد). از این رو کیفیت خاک با توجه به سازگاری با یک هدف خاص تفسیر می‌گردد (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳).

در نتیجه ارزیابی شاخص کیفیت خاک از طریق تعریف اهداف مدیریتی (به عنوان نمونه باروری خاک، بازیابی مواد زائد و آلاینده‌ها و حفاظت محیط زیست) که مرتبط با کارکردهای بحرانی خاک است، انجام می‌گردد. از آنجایی که کارکردهای خاک به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی مناسب که به عنوان شاخص کیفیت خاک نامگذاری می‌شوند، برای اندازه‌گیری غیرمستقیم چگونگی کارایی هر کارکرد انتخاب می‌شوند. حساسیت نسبت به تغییرات رخ داده در کارکرد مورد بحث، اصلی‌ترین شرط برای یک ویژگی از خاک است که به عنوان شاخص کیفیت خاک انتخاب گردد. همبستگی مثبت با خدمات زیست بوم، سهولت سنجش، حساس بودن به اقدامات مدیریتی و وجود داشتن در پایگاه‌های داده‌ای تا حد امکان از سایر ویژگی‌های مناسب برای شاخص کیفیت خاک می‌باشد (آرمنیز و همکاران، ۲۰۱۳). لازم به ذکر است که کارکردهای مهم خاک شامل نگهداری و انتقال آب و املاح، پایداری و مقاومت فیزیکی، چرخه عناصر غذایی، تصفیه مواد با قابلیت سمی بودن و حمایت از زیست پراکندگی و رستنگاه‌ها می‌باشد و یک شاخص کیفیت خاک نمی‌تواند تمام کارکردهای ذکر شده را پوشش دهد (آرمنیز و همکاران، ۲۰۱۳). در ضمن با تغییر محیط، عملکرد مورد انتظار از خاک نیز تغییر می‌کند و از این رو هیچ روشی برای مشخص کردن کیفیت خاک بر مبنای یک مجموعه فراگیر از شاخص‌ها وجود ندارد (لیما و همکاران، ۲۰۱۳).

از این رو کاملا واضح است که استاندارد سازی یک روش برای ارزیابی کیفیت خاک، از نظر علمی ساده نیست بلکه نیاز به تقویت فرایندهای تصمیم‌گیری مورد لزوم دارد (آرمنیز و همکاران، ۲۰۱۳). در حال حاضر هیچ استاندارد یا قرار دادی برای ارزیابی کیفیت خاک وجود ندارد و روش‌های موجود برای ارزیابی کیفیت خاک و خطر تخریب خاک، از روش‌های جمع آوری داده‌های کیفی تا روش‌های جمع آوری داده‌های کمی با جزئیات زیاد را در برمی‌گیرد. شاخص‌هایی که برای ارزیابی کیفیت خاک ارائه شده‌اند، پارامترهای قابل اندازه‌گیری هستند و متناظر با ملاک‌های ارزیابی و کمک کننده به پایش وضعیت و تغییرات می‌باشند (بون[1] و همکاران، ۲۰۱۲).

[1] - Bone

استفاده از روش‌های کمی با داده‌های با جزئیات بالا برای ارزیابی تمام خاک‌ها می‌تواند محدود کننده باشد. به دلیل محدودیت‌های سلسله مراتبی و زمان، اگر روش‌های با جزئیات مفصل به کار روند، امکان دستیابی به خاک‌هایی با اولویت بالا نخواهد بود. در رابطه با شناسایی منابعی از خاک که در معرض تخریب هستند، مجموعه‌ای از شاخص‌ها جهت گزینش مکان‌هایی با بیشترین احتمال تخریب مورد نیاز می‌باشد (بون و همکاران، ۲۰۱۲). طبق گفته رومینگ و همکاران (۱۹۹۵) استفاده از شاخص هایی که برای زارعین و مدیران اراضی مفهوم قابل درک داشته باشند، بهترین نتیجه از ارتباط بین علم با عمل در ارزیابی پایداری اقدامات مدیریت اراضی خواهد بود (لیما و همکاران، ۲۰۱۳).

تا به حال روش‌های متنوعی برای جمع‌آوری داده‌ها، اندازه‌گیری و ارزیابی کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از روش‌های عمدتا کیفی تا کاملا کمی شامل کارت‌های نمره‌دهی[1]، ارزیابی بصری خاک[2]، کیت‌های مزرعه‌ای[3]، آمایش خاک[4] و آنالیزهای آزمایشگاهی در تعیین کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

۱-۵-۱- ارزیابی بصری کیفیت و کارت‌های نمره دهی

کارت نمره‌دهی که یک روش تثبیت شده برای افزایش آگاهی‌ها در ارتباط با منابع خاک می‌باشد، کشاورزان را برای شناسایی خاک‌ها در ضمن ارزیابی اقدامات مدیریتی و ثبت تلاش‌های انجام شده در جهت بهبود منابع خاکی، تشویق می‌کند. کارت‌های نمره‌دهی کیفیت خاک را به صورت تابعی از تعدادی سوالات که ویژگی‌های خاک را منعکس می‌کنند، و در موضوعات خاک، آب و گیاه طراحی شده است ارزیابی می‌کند. این سوالات اکثرا به صورت چهار گزینه‌ای می‌باشد. دفتر حفاظت منابع طبیعی، قالب سلامت خاک را برای سازگار کردن کارت‌ها با موقعیت‌های بومی ارائه کرده است. یکی از سازگاری‌های کیفیت خاک با شرایط بومی ارزیابی بصری خاک و سامانه‌های مدیریت کیفیت خاک می‌باشد. برای این کار نمره‌دهی بر مبنای مشاهدات و مقایسه شاخص‌ها با اهداف بصری می‌باشد. بسته به اهمیت شاخص‌ها به هر شاخص یک وزنی مقرر می‌گردد و در نهایت این نمرات و وزن‌ها به یک نمره شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک منجر می‌گردد. شاخص‌های موجود در تعدادی از کارت-های نمره‌دهی و روش‌های ارزیابی بصری خاک با جزئیات در جدول ۱-۱ آمده است (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

[1] -scorecards
[2] visual soil assessments
[3] -field kits
[4] -soil surveys

جدول ۱-۱- شاخص‌های موجود در تعدادی از کارت‌های نمره‌دهی و روش‌های ارزیابی بصری خاک (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

شاخص مورد استفاده	منبع
نفوذپذیری، زهکشی، قدرت نگهداری آب، کرم خاکی، فعالیت زیستی، رنگ، ساختمان، پوسته سطحی، بافت، فرسایش، خاکورزی، تراکم، حاصلخیزی، پوشش سطحی، هواددهی، عمق خاک سطحی، ماده آلی، اسیدیته خاک، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، عناصر کم مصرف	رومیگ[1] و همکاران (۱۹۹۶)
نفوذپذیری، موجودات خاک، توده ریشه، فرسایش خاک، بقایای محصولات، تخلخل	فاسچینگ و استیکا (۱۹۹۸)
زهکشی، رطوبت، رنگ، کرم خاکی، ساختمان، نوع خاک، فرسایش خاک، تراکم	فیلیپس (۱۹۹۹)
بافت، ساختمان، تخلخل، رنگ، تعداد و رنگ ماتلهای خاک، کرم خاکی، پتانسیل عمق ریشه‌دوانی، تشخیص حضور سخت کفه، پوسته‌ای شدن سطح و پوشش سطحی، فرسایش خاک	شپیرد و همکاران (۲۰۰۰)
نفوذپذیری، رواناب، رنگ، فعالیت زیستی، ساختمان، فرسایش خاک، بقایای محصولات، رشد محصولات، اسیدیته خاک، تراکم، پوسته‌ای شدن	بلاک (۲۰۰۲)
بافت، ساختمان، رطوبت، پایداری، تخلخل، تخلخل زیستی، عمق، ضخامت لایه هوموسی، عمق موثر خاک، آب ایستابی، آبگریزی، عمق آب زیر زمینی، تشکیل پوسته و شکاف، رنگ، مقدار هوموس، ماتلهای خاک، اسیدیته خاک،کربنات‌ها، توسعه ریشه، عمق ریشه دوانی، موانع توسعه ریشه، فعالیت زیستی، تعداد کرم‌های خاکی و عمق حضور آنها	هوسکوا و مونتانارلا (۲۰۰۶)
آب ماندگی سطحی، رنگ،کرم خاکی، ساختمان و پایداری، لایه شخم، فرسایش خاک، تخلخل خاک، ماتل‌های خاک، جوانه زنی محصولات، ارتفاع محصولات، عملکرد محصولات	شپیرد (۲۰۰۸)

در کارت‌های نمره‌دهی سعی بر استفاده از اطلاعات کشاورزان و مدیران اراضی به منظور سهولت دسترسی به اطلاعات می‌باشد. مایرورا[2] و همکاران (۲۰۰۷) شاخص‌هایی از وضعیت کیفیت خاک را که با آگاهی‌های کشاورزان از کیفیت خاک سازگار بود را شناسایی کردند. نتایج گزارش شده در این مطالعه مشخص کرد که اطلاعات محلی برای طبقه بندی مناسب کیفیت خاک مناسب می‌باشد. در واقع کشاورزان تشخیص دادند که کیفیت خاک در طول زمان و مکان می‌تواند تغییر کند و رنگ، بافت، محصول دهی، کارایی زراعی و خاک‌ورزی شاخص‌های مورد استفاده کشاورزان بود.

[1] -Romig
[2]- Mairura

در یک مطالعه انجام شده در جنوب غربی بنگلادش، علی (۲۰۰۳)، نتیجه‌گیری کرد که اطلاعات کشاورزان از خاک، یک منبع اطلاعاتی بزرگ است که باید در پایگاه‌های داده‌ای علمی محلی بهره‌برداری، جمع آوری و ثبت شود و در سیاست گذاری‌های توسعه کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. در بنگلادش کشاورزان خاک‌ها را براساس ارتفاعشان از سطح رودخانه، سیل‌گیری، کاربری اراضی و تناسب زراعی گروه‌بندی کردند. کشاورزان برای شناسایی خاک‌ها از شاخص‌هایی مانند جرم حجمی (بر مبنای درکشان از فشردگی در هنگام عملیات زراعی و وزن کردن با دست)، بافت، ماده آلی (برمبنای بقایای گیاهی تجزیه شده، کود دامی و کرم‌های خاکی)، میزان شوری (از طریق مزه کردن) و حاصلخیزی (براساس میزان رشد گیاهی)، استفاده کرده‌اند. در ضمن کشاورزان اطلاعات زیادی در رابطه با عوامل تخریب خاک مانند فرسایش، شوری، جنگل‌زدایی و... داشتند.

باریوس و ترجو[1] (۲۰۰۳) برای بازنگری مفهوم کیفیت خاک در آمریکای لاتین یک تحقیق انجام دادند. در دشت‌های سیلابی رودخانه اورینوکو[2]، کشاورزان وقتی که دنبال محل‌های جدید برای زراعت بودند، انتخاب اولیه خود را برمبنای نوع پوشش گیاهی بومی به عنوان یک شاخص از کیفیت و حاصلخیزی خاک انجام دادند. مشخص است که مطالعه پوشش گیاهی ویژگی‌های متنوعی از خاک‌ها را در بر می‌گیرد. به علاوه آن‌ها به بافت و رنگ خاک نیز تاکید دارند و اینگونه تشخیص داده‌اند که خاک‌های با رنگ سیاه‌تر بهتر هستند. در هندوراس[3]، اریکسن و آردون[4](۲۰۰۳) بین دو نگرش برای کیفیت خاک (علمی در برابر عمومی یعنی کشاورزان) شباهت‌ها و تفاوت‌هایی مشاهده کرده‌اند. حرکت خاک و فاضلاب[5] در مقیاس بزرگ از نظر کشاورزان مسئله نگران کننده‌ای نبود. از نظر هر دو دیدگاه، بافت خاک، نوع لندفرم، میزان ماده آلی، رنگ و ضخامت افق A، و نفوذپذیری شاخص‌هایی از کیفیت خاک بودند.

شکل ۱-۵ و ۱-۶ دو نوع کارت نمره‌دهی و نحوه نمره دادن به شاخص‌های مختلف کیفیت خاک نشان داده شده است. در بخش‌هایی از کارت نمره‌دهی ارائه شده برای سنجش کیفیت خاک در منطقه ویسکانسین[6] امریکا (شکل ۱-۵) (در پیوست به صورت کامل قید شده است)، برای هر شاخص خاک، نمراتی از صفر تا ۴ در نظر گرفته شده است و برای هر وضعیت توضیح داده شده برای هر شاخص، نمره‌ای در این محدوده اختصاص می-یابد. اگر نمره ۴-۳ برای یک شاخص خاک در نظر گرفته شود، بیانگر سلامت این شاخص خاک است، اگر ۲/۵-۱/۵ باشد شاخص خاک صدمه دیده است و اگر ۱-۰ باشد شاخص خاک ناسالم است. در نهایت با محاسبه

[1]- Barrios and Trejo
[2] -Orinoco floodplains
[3] -Honduras
[4] -Ericksen and Ardón
[5] wastes
[6] -Wisconsin

مجموع تعداد شاخص‌های که در هر کدام از این محدوده‌های نمره‌دهی قرار می‌گیرند و تقسیم بر کل شاخص-های مورد سنجش، می‌توان درصد سلامت خاک را مورد ارزیابی قرار داد (شکل ۱-۵). در کارت نمره‌دهی ارائه شده برای سنجش کیفیت خاک توسط دفتر حفاظت منابع طبیعی (شکل ۱-۶)، هر شاخص به صورت کیفی و در سه کلاس ضعیف، متوسط و خوب نمره‌دهی می‌شود.

Analytical Properties	Score
Values are for typical soils of southeast Wisconsin	
21. ORGANIC MATTER[1]	
0 Organic matter less than 2% or greater than 8%	
2 Organic matter 2 to 4% or 6 to 8%	☐
4 Organic matter between 4 and 6%	
22. pH[8]	
0 Soil pH less than 6.4 or greater than 7.2	
2 Soil pH 6.4 to 6.7 or 7.0 to 7.2	☐
4 Soil pH between 6.7 and 7.0	
23. SOIL TEST – N, P, & K[9]	
0 Two or more nutrient levels very low, law of minimum at work	
2 Soil test values are below recommended levels, need extra inputs	☐
4 All nutrient levels at recommended levels	
24. MICRONUTRIENTS[30]	
0 Severe shortages of trace minerals (magnesium, zinc, sulfur, boron, etc.)	
2 Micronutrients at a minimal level or not balanced	☐
4 Levels of micronutrients high and balanced	

Health Category	Number	%
Healthy (score of 3 - 4)	☐	☐
Impaired (score of 1.5 – 2.5)	☐	☐
Unhealthy (score of 0 - 1)	☐	☐
Total	☐	100%

شکل ۱-۵- بخشی از کارت نمره‌دهی و نحوه نمره دادن به شاخص‌های مختلف کیفیت خاک در ویسکانسین امریکا (این کارت در پیوست به صورت کامل قید شده است)

SITE INDICATOR SCORECARD

for Connecticut Community Gardeners

NRCS
USDA, Natural Resources Conservation Service

Date: _____
Site Name: _____
Form Completed By: _____

☒ *applicable box*

Site Indicator	Poor	Tolerable	Best
Accessibility			
1. Walking distance to site.	10+ minutes. ☐	5-10 minutes. ☐	0-5 minutes. ☐
2. Availability of parking.	None. ☐	Difficult. ☐	No problem. ☐
3. Visibility from street.	Can't see site, or it is very visible. ☐	☐	Somewhat visible. ☐
4. Hilliness of site.	Very hilly. ☐	Some slope. ☐	Level or nearly level. ☐
Topography			
5. Direction the slope faces.	North. ☐	East, West. ☐	South. ☐
6. Bedrock, ledge, or large boulders on site.	Too many to work around. ☐	Some, but can work around them. ☐	None. ☐
Location/Distance to Water			
7. Water access -- city water, pond, or river for irrigation.	No water available on the site, and no access to bring it to site. ☐	Have to connect to city water or bring water to site. ☐	Water available easily. ☐
8. Water quality tested.	Bad quality, can't use. ☐	Fair quality. ☐	Good quality. ☐
9. Runoff.	After rainfall, a lot of soil washes from site. ☐	After rainfall, a little soil soil washes from site. ☐	After rainfall, no soil is seen to wash from site. ☐
10. Water on surface during the growing season (spring, summer, fall).	After a moderate rainfall, water stays on surface for a few days. ☐	After heavy rainfall, water stays on surface for a short time. ☐	After rainfall, no water is observed on the soil surface. ☐
11. Sun exposure through the day.	Shady, very little exposure. ☐	Sun is blocked some of the time. ☐	Mostly sunny. ☐
12. Amount of existing pavement on site.	Too much pavement, will interfere with plans for the site. ☐	Some, but can work around. ☐	None. ☐
13. Debris (construction materials, bricks, concrete, etc.)	A lot on the surface. ☐	Occasional. ☐	None. ☐
14. Shortcuts through site.	Lots. ☐	Some. ☐	None. ☐
15. Neighborhood pets.	Site used heavily by animals. ☐	Some use. ☐	No pet evidence observed. ☐
16. Human activity on site.	Lots of evidence of people on site. ☐	Some people use site. ☐	Very little or no evidence of people on site. ☐
17. What's growing on the site now?	Lots of unwanted trees or brush. ☐	Some unwanted trees and brush. ☐	Plants will not interfere with site plans. ☐
History of Site			
18. History of site.	Not known. ☐	Some stories may be true. ☐	Definitely known. ☐

SOIL INDICATOR SCORECARD
for Connecticut Community Gardeners

NRCS
USDA, Natural Resources Conservation Service

Date: _____
Site Name: _____
Form Completed By: _____

☒ *applicable box*

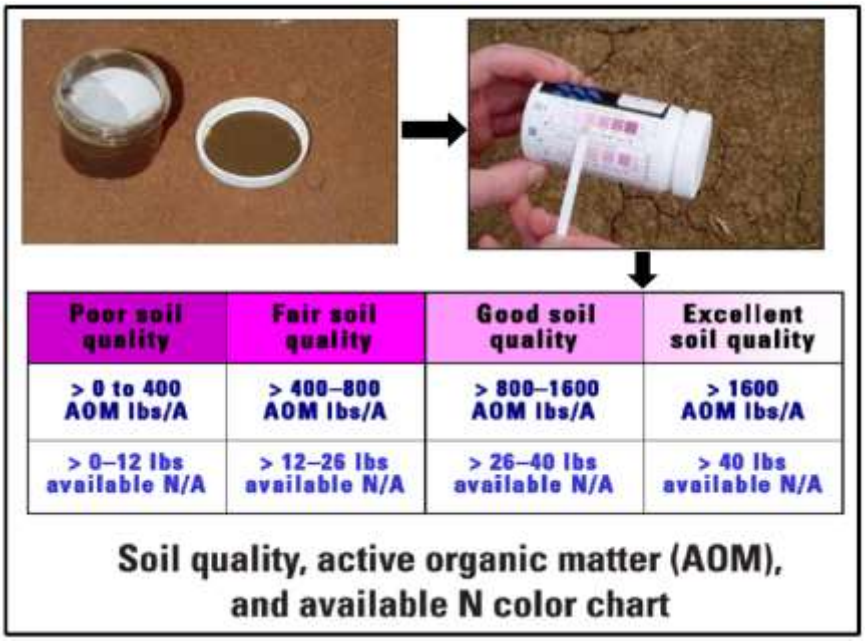
Soil Indicator	Poor	Tolerable	Best
19. Can you use the soil that is on the site? (Is there soil on this site?)	No. Need to bring soil to site. ☐	Some. ☐	Yes, all soil is workable. ☐
Surface of Soil			
20. Cracks on soil surface in July and August.	Many cracks. ☐	Occasional thin cracks. ☐	No cracks. ☐
21. How do existing plants grow? Compare same kind of plant.	Plants are dead or scraggly. ☐	Plant color and size are different. ☐	Plants look healthy. ☐
Soil Examination			
22. Smell of soil.	Oily, chemically, gasoline, rotten eggs, or bad or strange. ☐	No smell. ☐	Fresh, earthy. ☐
It is not possible to smell some contaminants, like lead, in the soil. Avoid the site if the soil smell is poor unless you can determine the site history is safe and environmental testing for contaminants indicates the areas is safe. Do not touch the soil if the smell is offensive.			
23. How hard is it to dig a hole two feet deep?	Not possible. ☐	Moderately difficult. ☐	Easy. ☐
24. Try to insert a wire coat hanger into soil surface two days after rainfall during the growing season.	Coat hanger bends or cannot be inserted. ☐	Coat hanger can be pushed in with pressure. ☐	Coat hanger goes in easily with fingers. ☐
	and		
	Soil feels firm. ☐	Soil feels somewhat firm. ☐	Soil feels loose. ☐
25. Depth of soil	Less than 1 foot. ☐	Between 1 and 2 feet. ☐	More than 2 feet. ☐
26. Depth of topsoil layer	0-2 inches. ☐	2-5 inches. ☐	5+ inches. ☐
27. Color of topsoil layer	Yellow, gray, multi-colored. ☐	Light brown. ☐	Black, dark brown, dark red, color is uniform. ☐
28. Moisture of soil two days after heavy rain.	Soil is very dry or very wet. ☐	Soil is somewhat dry or muddy. ☐	Soil is moist, but not muddy. ☐
29. How quickly water drains in one foot deep hole during the growing season.	Water stays in hole and doesn't drain after 15 minutes. ☐	Water drains, but less than one inch in 15 minutes. ☐	Water enters soil quickly and moves down more than one inch in 15 min. ☐
30. How does moist soil feel (texture) -- ***Use Guide to Soil Texture by Feel*** Handbook.	Sand, loamy sand, sandy clay, silty clay, or clay. ☐	Clay loam, silty clay loam, or sandy clay loam. ☐	Sandy loam, loam, or silt loam. ☐
31. How moist soil particles hold together.	Soil is hard and very difficult to break with fingers. ☐	Soil breaks apart with some difficulty with fingers. ☐	Soil crumbles easily with fingers. ☐
32. Roots in the top 12 inches of soil.	None. ☐	Some, roots grow mostly across the soil, not down. ☐	Many, roots grow mostly down into the soil, not across. ☐
33. Worms and other bugs in the soil.	None. ☐	A few. ☐	Many. ☐
34. Stones or rocks in the soil.	Too many. ☐	Some. ☐	None. ☐
35. Debris in the soil (bricks, construction materials, glass, concrete, etc.)	Too much to dig around. ☐	A little bit, doesn't interfere with digging. ☐	None. ☐
36. Rotten stumps, old trees in the soil.	Lots of stumps and trees. ☐	A few small pieces. ☐	None. ☐

شکل ۱-۶- کارت نمره‌دهی و نحوه نمره دادن به شاخص‌های مختلف کیفیت خاک

۱-۵-۲- بسته آزمون کیفیت خاک

بسته‌های آزمون کیفیت خاک در آمریکا و توسط دفتر خدمات تحقیقات کشاورزی[1]در جهت ارزیابی سریع تعدادی از صفات خاکی، ارائه داده‌های نیمه کمی بر مبنای شاخص کیفیت خاک و عمدتا در لایه سطحی ایجاد شده است. این وسیله عمدتا برای مقایسه خاک‌های تحت سامانه‌های مدیریتی مختلف، نشان دادن تغییرات کیفیت خاک در گذر زمان، اثبات اثرات اقدامات مدیریتی مختلف همانند شخم حفاظتی بر کیفیت خاک، و برای ایجاد آگاهی عمومی در رابطه با اهمیت کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفته است. بخش کیفیت خاک دفتر حفاظت منابع طبیعی آمریکا[2] با افزودن یک دفترچه راهنما و چندین تست اضافی شامل پایداری خاکدانه‌ها، کرم‌های خاکی، و ازهم پاشیدن خاک[3] و مشاهدات مورفولوژیکی انتخاب شده از خاک، این کیت‌ها را برای استفاده عمومی سازگار کردند. بسته‌های آزمایشی[4] در حال حاضر دارای ۱۲ تست شناخته شده از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک بوده و جزئیات تفسیر هر آزمایش در دسترس قرار دارد (بون و همکاران، ۲۰۱۲). شکل ۱-۷ نمونه‌ای از این بسته‌ها و نحوه استفاده آنها در عرصه را نشان می‌دهد.

[1] -Agricultural Research Service
[2]- NRCS Soil Quality Institute
[3]- soil slaking
[4] -Test kit



شکل ۱-۷- نمونه‌ای از بسته آزمون کیفیت خاک برای سنجش میزان ماده آلی و نیتروژن قابل دسترس

۱-۵-۳- آنالیزهای آزمایشگاهی

هنگام طراحی روش‌های ارزیابی، تعیین کارکرد مورد انتظار از خاک و انتخاب شاخص‌های مشخص کننده توانایی خاک در اجرای این کارکردها نکته ضروری می‌باشد. در رابطه با هدف حفاظت و استفاده پایدار از خاک معیارهای استفاده شده وضعیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را منعکس می‌کنند (بون و همکاران، ۲۰۱۲). به عبارت دیگر برای ارزیابی کیفیت خاک از خصوصیاتی تحت عنوان نمایه استفاده می‌شود (ارشد و مارتین، ۲۰۰۲). کیفیت خاک نمی‌تواند به طور مستقیم محاسبه شود، اما خصوصیاتی از خاک که حساس به تغییرات مدیریتی هستند، می‌توانند به عنوان نمایه مورد استفاده قرار گیرند (آندروز و همکاران،۲۰۰۴). از طرفی می-توان کیفیت خاک را یک فرآیند ارزیابی قلمداد نمود که شامل یک سری از فعالیت‌ها مانند انتخاب نمایه‌های سلامت خاک، تعیین دسته داده‌های حداقل[1] و ابداع برنامه‌ی تفسیر نمایه‌ها می‌باشد (کینیانجی،۲۰۰۷). انتخاب نمایه‌های مناسب کیفیت خاک می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای ارزیابی پایداری خاک و عملیات مدیریتی محصول در تعداد زیادی از خاک‌ها مطرح باشد (کارلن و همکاران،۲۰۰۳). خصوصیات تقریبا ثابت خاک مانند بافت یا شیب، ارزش اندکی برای ارزیابی اثر مدیریت بر خاک دارند. از سوی دیگر، خصوصیات کم دوام خاک مانند مقدار رطوبت و دمای خاک، واکنش شیمیایی خاک سطحی، و مواد غذایی محلول به راحتی با تغییر آب و هوا و مدیریت معمول مانند آبیاری، شخم و کوددهی تغییر می‌کنند. در نتیجه این خصوصیات نیز برای شناخت

[1]- Minimum Data Set (MDS)

و ارزیابی اثر دراز مدت مدیریت بر کیفیت خاک مناسب نیستند. در بین این دو حد، خصوصیات متعددی از خاک قرار دارند که در مقیاس زمانی چند ماه تا چند سال تحت تاثیر اقدامات مدیریت خاک تغییر نموده و دارای حساسیت لازم برای ارزیابی چگونگی عملکرد خاک در زیست‌بوم می‌باشند که می‌توانند در ارزیابی کیفیت خاک ناشی از عملیات مدیریتی مورد استفاده قرار گیرند. در انتخاب نمایه‌های کیفیت خاک معیارهایی مورد توجه قرار می گیرند که دارای شرایط زیر باشند:

- به راحتی قابل ارزیابی باشند،
- اندازه‌گیری تغییرات عملکرد خاک توسط آنها در قطعات کوچک و بزرگ امکان‌پذیر باشد،
- برای گرفتن تصمیمات مدیریتی، به موقع قابل ارزیابی باشند،
- بیشتر کشاورزان توان ارزیابی آنها را داشته باشند،
- حساس به تغییرات بوم‌شناختی کشاورزی منطقه باشند،
- معرف خصوصیات فیزیکی، زیستی و شیمیایی خاک باشند،
- از طریق روش های کمی و یا کیفی نیز قابل ارزیابی باشند (کینیانجی،۲۰۰۷).

در انتخاب نهایی نمایه‌های کیفیت خاک باید نوع کاربری اراضی، رابطه میان نمایه‌ها و وظایف خاک، سهولت و قابلیت اعتماد در اندازه‌گیری، کمی و قابل تفسیر بودن، تغییرات زمانی و مکانی نمایه‌ها و اهمیت این تغییرپذیری، حساسیت قابل اندازه‌گیری به تغییرات مدیریت خاک در مقیاس زمانی مورد نظر، قابلیت اندازه‌گیری با روش‌های معمول و اقتصادی را مد نظر قرار داد. ویژگی‌های خاک که در بیشتر پژوهش‌های مربوط به کیفیت خاک مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است در سه گروه متفاوت ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به معرفی برخی از این شاخص‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۵-۳-۱- شاخص‌های فیزیکی خاک

کیفیت فیزیکی خاک به شکل‌های مختلفی مشخص می‌شود. هنگامی که خاک‌ها یک یا چند مورد از خصوصیات زیر را نشان دهند کیفیت فیزیکی ضعیفی دارند: قابلیت کم نفوذ آب در خاک، رواناب سطحی، سخت شدگی، تهویه ضعیف، قابلیت ریشه‌دوانی ضعیف و کارپذیری سخت[1] در خاک (دکستر، a۲۰۰۴). انواع صفات خاکی که به عنوان شاخص فیزیکی در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از:

ماده آلی خاک: اجزای مختلف مواد آلی خاک از شاخص‌های مهم فیزیکی، شیمیایی و زیستی در کیفیت خاک محسوب می‌شوند. ماده آلی نقش مهمی در بهره‌وری گیاهی شامل کارکردهای زیستی مرتبط با رشد

[1] -Poor Workability

میکروارگانیسم‌های مفید و موجودات زنده در اندازه ریز، متوسط و درشت (همانند کرم‌های خاکی)؛ کارکردهای شیمیایی مرتبط با چرخه عناصر غذایی ضروری (همانند نیتروژن، فسفر و گوگرد) و تامین آن‌ها؛ و کارکردهای فیزیکی مرتبط با ساختمان خاک، خاک‌ورزی، سله سطحی، روان آب، ورود، نگهداری و انتقال آب و هوا دارد. وضعیت ماده آلی خاک از اقدامات مدیریتی همانند شدت خاک‌ورزی، مدیریت بقایای گیاهی، تنوع و تراکم کشت تاثیر می‌پذیرد.

خاکدانه‌سازی: آرایش ذرات اولیه را در واحدهای ساختمانی نشان می‌دهد. ضمن محدودیت‌های ذاتی مرتبط به ساختمان خاک (به عنوان مثال خاک‌های شنی معمولا تعداد خاکدانه‌ها و پایداری ساختمان کمتری نسبت به خاک‌های لوم، لوم رسی و یا خاک‌های رسی دارند)، خاک‌های با یک سطح بهینه از خاکدانه‌سازی، در برابر سله سطحی مقاوم‌تر بوده و از این رو نفوذ سریع و راحت‌تر آب و هوا را ممکن می‌سازند. خاک‌های با ساختمان خوب تماس بهتر خاک- بذر مهیا کرده که باعث انتقال سریعتر آب به بذر شده و جوانه‌زنی را تسریع کرده و عموما باعث استقرار یکنواخت گیاه مورد نظر می‌گردد. خاکدانه‌سازی اصولا از شدت عملیات خاک‌ورزی و مدیریت بقایا تاثیر می‌پذیرد.

شیب منحنی رطوبتی خاک: از منحنی رطوبتی و بخصوص ارزیابی تغییرات شیب آن نیز به عنوان شاخص پایداری استفاده شده است. گویریف و همکاران (۲۰۰۱) تخلخل خاک را به دو بخش ساختمانی و بافتی تقسیم کردند. تخلخل ساختمانی شامل منافذ میکرو، منافذ زیستی و ساختمانی ماکرو است که در اثر خاک‌ورزی به وجود می-آیند. نامبردگان تخلخل ساختمانی را بسیار حساس به مدیریت خاک‌های زراعی دانسته‌اند. دکستر (۲۰۰۴) با توجه به تاثیرپذیری عمیق منحنی رطوبتی از اندازه و آرایش منافذ خاک و با تمرکز به این مسئله طی تحقیقات پایه‌ای جالب نشان داد که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن (S) می‌تواند منعکس کننده جنبه‌های مختلف از کیفیت خاک از قبیل نفوذ، سخت شدگی و فشردگی باشد. دکستر (b۲۰۰۴) بر اساس اطلاعات جمع آوری شده از خاک در هفت کشور که مقادیر رس آنها بین ۴ تا ۷۳ درصد بود، کلاسهای زیر را برای شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد کرد: S<۰/۰۲۰ : خیلی ضعیف، ۰/۰۲۰< S<۰/۰۳۵: ضعیف و S>۰/۰۳۵ : خوب. با وجود دامنه وسیع رس در بررسی‌های به عمل آمده توسط دکستر (b۲۰۰۴) بعضی از خاک‌های شنی ممکن است از طبقه‌بندی فوق مستثنی باشند. تغییرات کیفی خاک‌ها با گذشت زمان با استفاده از شاخص S می‌تواند ارزیابی گردد که از این رو این شاخص یک ابزار ارزشمند در کمی‌سازی تخریب خاک یا بهبود آن و در ارزیابی کیفیت فیزیکی منابع جهانی خاک باشد.

جرم مخصوص ظاهری: به صورت جرم خاک خشک بر واحد حجم تعریف می‌شود. به دلیل اثرات بالقوه‌ای که بر گسترش و توسعه گیاهان دارد، حجم خاکی را که هر گیاه برای تامین نیاز آبی و عناصر غذایی خود در اختیار دارد، را نشان می‌دهد. به عنوان یک شاخص مهم از کیفیت خاک مشخص شده است. اقدامات مدیریتی همانند شخم، الگوهای رفت و آمد وسایل نقلیه، زمان‌بندی عملیات زراعی (به دلیل برهمکنش با میزان آب خاک) و مدیریت بقایای گیاهی بر جرم حجمی خاک موثرند (کارلن و همکاران، ۲۰۰۸).

شاخص فرسایش‌پذیری: یکی از عوامل مهم و موثر بر کیفیت خاک، شاخص فرسایش پذیری آن می‌باشد. کیفیت خاک بر میزان فرسایش و تخریب خاک اثر گذار بوده و فرسایش نیز بر کیفیت خاک مؤثر است، از این رو دو پارامتر کیفیت و فرسایش خاک به شدت به یکدیگر وابسته‌اند (سینگ و خِرا،۲۰۰۹). فرسایش سبب کاهش شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک مانند ظرفیت نگهداری آب و پایداری ساختمان خاک می‌شود. همچنین با تغییر کاربری زمین و افزایش شدت عملیات زراعی میزان فرسایش افزایش و شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک کاهش می‌یابند (والاس و تری،۱۹۹۸).

۱-۵-۳-۲- شاخص‌های شیمیایی خاک

مواد آلی ذره‌ای (POM[1]): کربن آلی خاک از مهمترین و کلیدی‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت خاک بوده و پتانسیل زیادی برای تغییر در اثر مدیریت‌های مختلف کشاورزی دارد. وابستگی بین میزان تولید محصول با مقدار کربن آلی خاک نیز توسط پژوهشگران به اثبات رسیده است. با این وجود کربن آلی به تنهایی نمی‌تواند به عنوان شاخص حساس مواد آلی خاک مطرح شود. گریگوریچ و همکاران (۱۹۹۴)، مواد آلی ذره‌ای را به عنوان ترکیبی مفید جهت ارزیابی کیفیت خاک معرفی کردند. مواد آلی ذره‌ای از بخش‌های مهم مواد آلی ناپایدار خاک محسوب شده و شامل بقایای گیاهی است که کمتر دچار تجزیه شده است. مواد آلی ذره‌ای نزدیک به ۳۹ درصد کربن آلی خاک را تشکیل می‌دهد (فلاح زاده و حاج عباسی، ۱۳۹۰).

کربوهیدرات‌ها: از دیگر ذخایر مواد آلی خاک کربوهیدرات‌ها هستند که از دیدگاه کشاورزی مهمترین ویژگی و وظیفه آنها، پیوند دادن ذرات در خاکدانه‌های پایدار می‌باشد. این ترکیبات همچنین به نگهداری آب در خاک کمک کرده و به علت تأثیر در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها، در کیفیت خاک نقش بسزایی دارند (فلاح زاده و حاج عباسی، ۱۳۹۰).

واکنش خاک: pH خاک بر دسترسی عناصر غذایی (همانند فسفر ورودی) و همچنین میزان سمیت آن‌ها (آلومینیوم و منگنز) و میزان کمبودشان (منگنز، آهن و روی)، بر فرایندهای آمونیفیکاسیون و نیتریفیکاسیون،

[1] -Particulate organic matter

رفتار میکروبی، رشد ریشه گیاهان و توسعه آن‌ها اثرگذار است. همچنین pH خاک یک شاخص خوب از اثرات اقدامات مدیریتی همانند استفاده از کودهای آمونیومی، آهک‌دهی و کودهای دامی می‌باشد.

هدایت الکتریکی (EC): عموما با تعیین میزان شوری خاک در ارتباط است، همچنین می‌تواند به عنوان یک مقیاسی از عناصر غذایی محلول (هم کاتیون‌ها و هم آنیون‌ها) باشد. در داخل یک محدوده معین، EC می‌تواند به عنوان شاخصی از میزن فراهمی عناصر غذایی برای گیاهان باشد و حد پایینی آن نشان دهنده خاک فقیر از عناصر غذایی است که از نظر ساختمان غیر پایدار بوده و به سهولت دیسپرس می‌گردد. مقادیر بالای EC اغلب نشان دهنده شرایط ضعیف رشد گیاهی و امکان به وجود آمدن مسائل شوری می‌باشد.

شوری و SAR: در نواحی خشک و نیمه خشک باعث تجمع نمک‌ها در افق‌های نزدیک سطح خاک می‌گردد.

فسفر قابل دسترس گیاه: به دلیل نقش فسفر در رشد گیاهان، این یک شاخص مهم می‌باشد. البته در صورت وجود روان آب سطحی، برای اطمینان از خطرات زیست محیطی فسفر، پایش پیوسته آن ضروری می‌باشد. اقدامات مدیریتی از طریق کود شیمیایی، افزودن کود دامی، و نگهداری pH در نواحی خنثی می‌تواند بر دسترسی فسفر موثر باشد.

نیترات: اثرات باقیمانده بسیاری از اقدامات همانند تناوب گیاهی، راهبرد کوددهی و استفاده از کودهای دامی را نشان می‌دهد. این شاخص همچنین اطلاعاتی در رابطه با ظرفیت آبشویی و امکان آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی و انتشار گازهای اکسید نیتروژن به دست می‌دهد.

۱-۵-۳-۳- شاخص‌های زیستی خاک

شاخص‌های زیستی نسبت به سایر شاخص‌ها در برابر تغییرات خاک حساسیت بیشتری دارند و قادر هستند کیفیت خاک را در محدوده وسیع‌تری توصیف کنند. در مورد شاخص‌های زیستی می‌توان این چنین گفت که جامعه میکروبی خاک به عنوان حیاتی‌ترین عضو اکوسیستم، می‌تواند هر گونه تغییر در عملکرد اکولوژیکی خاک را انعکاس دهد.

تنفس میکروبی خاک: میزان تنفس بیانگر فعالیت زیستیک میکروارگانیزم‌ها، ماکروارگانیزم‌ها و ریشه‌های گیاهی می باشد.

کربن زیتوده میکروبی: یک سنجش از فعالیت میکروبی در داخل خاک ارائه می‌دهد. چرخه عناصر غذایی را که برای رشد گیاه ضروری هستند را منعکس می‌کند. از اقدامات مدیریتی همانند شدت خاک‌ورزی، نوع گیاه (یکساله یا چندساله)، یا روش مدیریت بقایا نیز تاثیر می‌پذیرد.

بهره متابولیکی[1] **(qCO_2)**: نسبت تنفس به زیتوده میکروبی (نسبت کربن-دی اکسیدکربن در ساعت بر کرین میکروبی[2]) می‌باشد. از نظر فیزیولوژیکی این شاخص ماده اولیه معدنی شده را نسبت به کربن زیتوده میکروبی توصیف می‌کند. بهره متابولیکی برمبنای تئوری آدامز[3] در رابطه با توالی زیست‌بوم[4]، به طور گسترده به عنوان یک شاخص از میزان تکامل زیست‌بوم عمل می‌کند که در طول توسعه زیست بوم کاهش یافته و با آفشتگی و افزایش بی‌نظمی در زیست‌بوم فرض بر افزایش آن است. میزان بالای (qCO_2) در جوامع میکروبی از محیط‌های جوان در مقایسه با محیط‌های تکامل یافته مشاهده شده است. این نسبت به عنوان یک شاخص خوب برای ارزیابی تغییرات روی داده در خاک به دلیل آلودگی فلزات سنگین، جنگل‌زدایی، تغییرات دمایی، یا تغییر در اقدامات مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (باستیدا و همکاران، ۲۰۰۸).

نسبت کربن زیتوده میکروبی به کربن آلی کل: این نسبت در مقایسه با کربن کل شاخص حساس‌تری برای ارزیابی تغییرات خاک می‌باشد. چرا که زیتوده میکروبی نسبت به ماده آلی، به تغییرات خاک پاسخ سریعتری می‌دهد. این بدان معنی است که اگر یک خاک در حال فرایند تخریب باشد، این تخریب در ابتدا توسط تغییرات میکروبی شناسایی می‌شود، در حالی تغییرات در ماده آلی در مراحل اولیه تخریب نمی‌تواند شناسایی گردد. نقطه ضعف این شاخص اثر هم‌پوشانی برخی عوامل است به عنوان نمونه تغییرات این نسبت به دلیل کوددهی یا اقدامات زراعی می‌تواند با فاکتورهای اقلیمی موثر بر این نسبت پوشانیده شود.

۱-۶- ارزیابی کمی کیفیت خاک

۱-۶-۱- دسته داده‌های حداقل

از آن جائی که اندازه‌گیری تمام خصوصیات خاک برای ارزیابی کیفیت خاک مقرون به صرفه و مقدور نیست، همچنین اندازه‌گیری بسیاری از خصوصیات مشکل بوده و یا دارای همبستگی زیادی با یکدیگر می‌باشند، برخی از خصوصیات باید انتخاب و دسته داده‌های حداقل [5] مورد نیاز ایجاد گردد (علی‌محمدی، ۱۳۸۸). شاخص کیفیت خاک می‌تواند به صورت حداقل مجموعه پارامترها تعریف گردد که وقتی باهم ادغام می‌گردند، یک داده عددی را ارائه می‌دهند که ظرفیت یک خاک را برای انجام یک یا چند کارکرد نشان می‌دهد (باستیدا و همکاران، ۲۰۰۸). لارسون و پیرس، (۱۹۹۴) برای انتخاب حداقل مجموعه‌ی داده‌ها جهت اندازه‌گیری کیفیت

[1] -metabolic quotient
[2] - CO_2-C h^{-1}. $C_{micr}{}^{-1}$
[3] - Odum's
[4] -ecosystem succession
[5] - Minimum Data Set (MDS)

خاک و تغییرات آن به دلیل اقدامات مدیریتی، نمایه‌های کلیدی مانند بافت خاک، ماده‌ی آلی، واکنش خاک، وضعیت موادغذایی، جرم‌مخصوص‌ظاهری، هدایت‌الکتریکی و عمق ریشه‌زایی را پیشنهاد نمودند. جمع‌آوری دسته داده‌های حداقل به شناسایی نمایه‌های مناسب خاک و ارزیابی ارتباط بین نمایه‌های انتخاب شده و خصوصیات مهم خاک و گیاه کمک می‌کند (ارشد و مارتین، ۲۰۰۲).

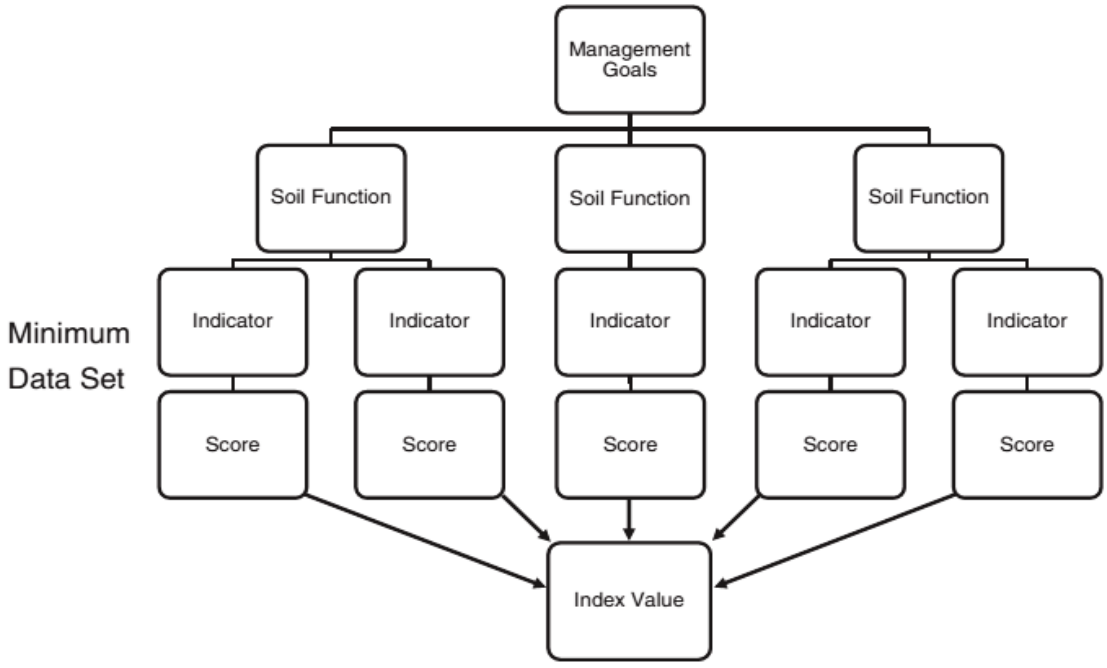
یکی از مسائل مهم برای تعیین کیفیت خاک، انتخاب شاخص‌ها است. شاخص‌هایی که برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده می‌شوند در سامانه‌های کشت، انواع خاک‌ها و کاربری‌های اراضی متفاوت هستند. ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا ترکیبی از آنها می‌باشند. بعضی از پژوهشگران مجموعه‌های مختلفی از ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک را برای تعیین شاخص کیفیت خاک پیشنهاد و شاخص کیفیت خاک را بر اساس مجموعه‌ی ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک[1] تعیین کرده‌اند (دوران و پارکین، ۱۹۴۰؛ راینولدس و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین برخی دیگر از پژوهشگران، تعداد کمتری از ویژگی‌هایی خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک هستند، را به عنوان دسته ویژگی‌های حداقل موثر بر کیفیت خاک[2] معرفی کرده‌اند (گوارتس[3] و همکاران، ۲۰۰۶؛ آندروز و همکاران، ۲۰۰۲a؛ آندروز و همکاران، ۲۰۰۲ b) انتخاب این ویژگی‌ها بر حسب بیشترین همبستگی با شاخص کلی کیفیت خاک و سهولت اندازه‌گیری آنها، صورت گرفته است. استفاده از دسته داده‌های حداقل موجب کاهش تعداد ویژگی‌های مورد نظر و سهولت و کاهش هزینه تعیین شاخص کیفیت خاک می‌شود.

لیما و همکاران (۲۰۱۳) شاخص کیفیت خاک را که برمبنای روش مارلن و استات (۱۹۹۴) و با استفاده از ۳ سری داده، شامل ۲۹ صفت خاکی، حداقل مجموعه داده‌ها شامل ۸ صفت خاکی و ۴ صفت که به صورت مستقل از هم و توسط کشاورزان انتخاب شده بودند، با یکدیگر مقایسه کردند. تاثیرات اقدامات مدیریت اراضی بر کارکردهای خاک (نفوذ آب در خاک، ذخیره و تامین و چرخه عناصر غذایی، فعالیت زیستی پایدار) را مورد ارزیابی قرار دادند. استفاده از ۲۹ صفت اندازه‌گیری شده برای تعیین وضعیت کیفیت خاک بهترین ارزیابی را نشان داد، البته استفاده از مجموعه کمتر از شاخص‌ها، تغییرات مشابهی را در بین سامانه‌های مدیریتی، کلاس بافتی و کارکردهای خاک نشان داد و اطلاعات بامفهوم و قابل استفاده‌ای برای مدیران اراضی در رابطه با کیفیت خاک ارائه داد. در کل اینگونه نتیجه‌گیری کردند که استفاده از تعداد کم شاخص‌ها می‌تواند نتایج قابل قبولی در رابطه با ارزیابی کیفیت خاک در طول زمان ارائه دهد.

---

[1] - Total Data Set (TDS)
[2] - Minimum Data Set (MDS)
[3] - Govaerts

دسته داده‌های حداقل، برای بدست آوردن درک جامعی از خصوصیات ارزیابی شده‌ی خاک مورد نیاز می‌باشد و به عنوان ابزار مفیدی برای آزمودن شرایط، کیفیت و سلامت خاک به‌کار می‌رود. از طرف دیگر به دلیل پیچیدگی خاک‌ها و ارتباط زیاد بین این صفات و اثرات متقابل آن‌ها و کیفیت خاک، فقط یک ویژگی خاک به تنهایی قادر نخواهد بود که اطلاعات جامعی راجع به وضعیت کیفیت خاک ارائه دهد. بنابراین شماری از شاخص‌ها از طریق ارزیابی اطلاعات اضافی همانند اقلیم، ویژگی‌های ذاتی خاک، سامانه‌های زراعی، یا اطلاعات خاص کاربری انتخاب می‌شوند. پس از آن مجموعه شاخص‌های پیشنهادی براساس ارتباط موجود با هر کارکرد خاک گروه‌بندی می‌شوند و کاربر شاخص‌هایی را برای تعیین قدرت، محدودیت، توانایی یا قابلیت خاک را در رابطه با هدف مدیریتی مشخص می‌کند (بون و همکاران، ۲۰۱۲). به بیان دیگر، به دلیل پیچیدگی‌های سامانه خاک و سختی جمع آوری داده‌های متناسب با ارزیابی اثرات فشارهای وارده بر کیفیت خاک، برای تعدادی از کارکردها، یک سیستم متشکل از معیارها و شاخص‌ها استفاده شده است. در این روش یکسری موارد ضروری برای هر نوع پایداری مورد ارزیابی تعریف می‌کنند، هر معیار مربوط به یک مورد ضروری از پایداری می‌باشد که می‌تواند توسط یک یا چندین شاخص توصیف گردد. شاخص‌ها پارامترهای قابل اندازه‌گیری و متناظر با یک معیار خاص می‌باشند. اندازه‌گیری این شاخص‌ها به پایش وضعیت موجود کمک کرده و تغییرات کمی و کیفی را مشخص می‌کند و واژه‌هایی را توصیف می‌کند که ارزش هر معیار مشخص را منعکس می‌کند. علاوه براین از آنجایی که ارزیابی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلفی انجام می‌گیرد و هرکدام نیازمند ترکیب متفاوتی از شاخص‌ها می‌باشند تا بتوانند کارکردهای معینی از خاک را منعکس کنند، حداقل مجموعه داده‌ها که برای تعیین قابلیت خاک در انجام یک کارکرد خاص استفاده می‌شوند، بایستی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی و همچنین فرایندهای پیچیده این سیستم را بتوانند توصیف کنند (شکل ۱-۸) (بون و همکاران، ۲۰۱۲). به دلیل زیاد بودن مقدار داده‌های جمع آوری شده در ارزیابی کیفیت خاک، روش حداقل مجموع داده-ها ارائه شده است.



شکل ۱-۸- مراحل انتخاب حداقل مجموعه داده‌ها، استاندارد سازی و انتخاب شاخص

بون و همکاران (۲۰۱۲) اظهار داشتند که روش‌های مختلفی از جمله نظر متخصص (مانند لارسون و پیرس، ۱۹۹۱؛ دوران و پارکین، ۱۹۹۴؛ کارلن و همکاران، ۱۹۹۶) و کاهش آماری داده‌ها[1] (باچمن و کینزل، ۱۹۹۲؛ بنتام و همکاران، ۱۹۹۲؛ برجدا و همکاران، ۲۰۰۰، آندروز و کارول، ۲۰۰۱؛ آندروز و همکاران، ۲۰۰۲، رضائی و همکاران، ۲۰۰۶) برای انتخاب شاخص کیفیت، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کاهش آماری داده‌ها معمولا با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی[2] انجام می‌شود که در ادامه شرح داده خواهد شد. در نهایت هنگامی که مقادیر اندازه‌گیری شده جمع بندی شدند به یک عدد بدون واحد تبدیل می‌شوند که رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده از یک شاخص و ظرفیت خاک را در رابطه با عملکرد مربوطه تعیین می‌کند (شکل ۱-۸) (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

۱-۶-۱-۱-کاهش آماری داده‌ها

کاهش آماری داده‌ها عموما با استفاده از روش آماری تجزیه مولفه‌های اصلی صورت می‌گیرد و در این روش فرض اصلی براین است که مجموعه شاخص‌های اولیه، دربردارنده شاخص‌های مناسب بازگو کننده کارکرد مورد نظر از خاک می‌باشد. با این وجود استفاده از روش‌های آماری برای کاهش داده‌ها نیازمند درجه‌ای از اطلاعات

1 - statistical data reduction
2 - Principal Component Analysis (PCA)

تخصصی و مجموعه‌ای گسترده از داده‌ها برای شاخص‌های خاک همراه با تعداد زیادی مشاهدات می‌باشد. انتخاب شاخص‌ها به اهداف اجتماعی شامل مقاصد اقتصادی-اجتماعی و محیط زیستی بستگی دارد و وزن دهی‌های متفاوت متناسب با پارامترهای مختلف صورت می‌گیرد.

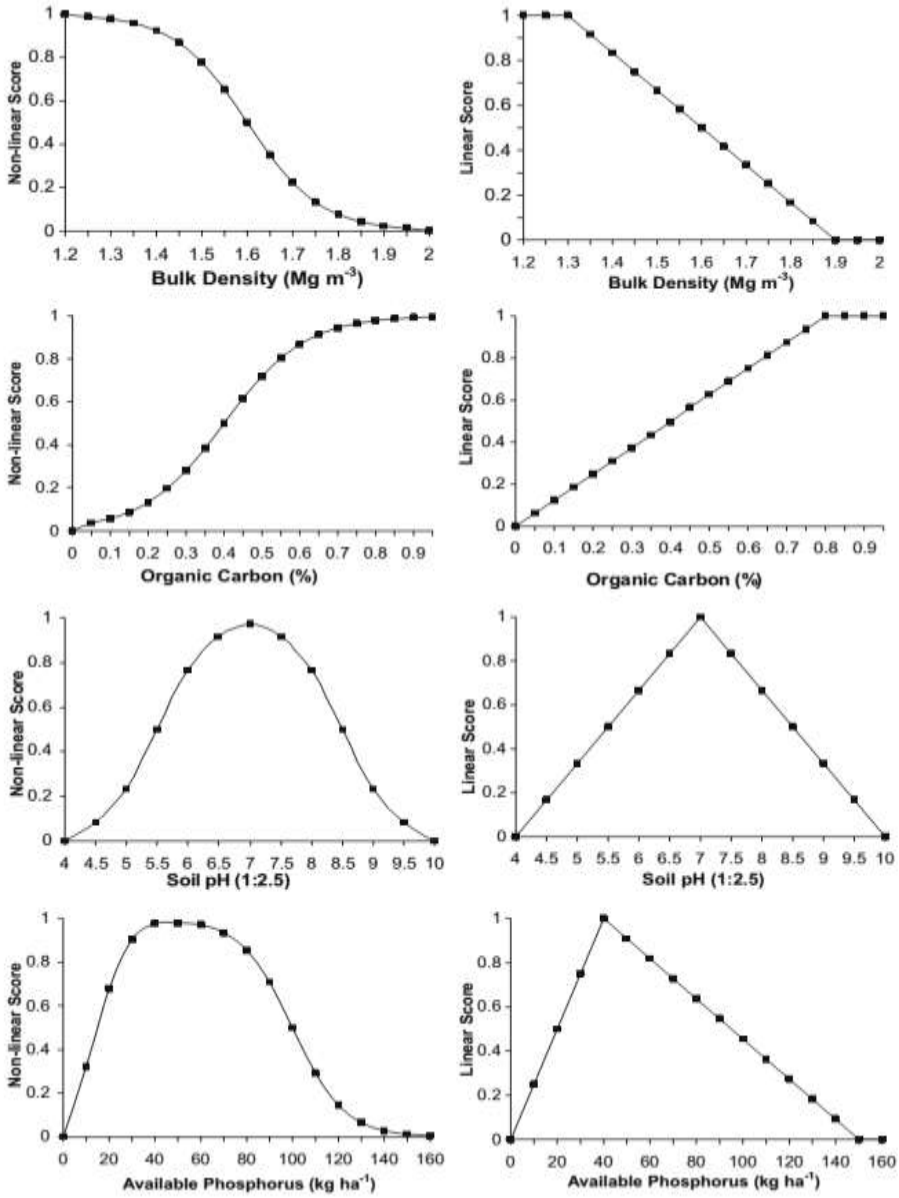
آندروز و همکاران (a۲۰۰۲) روش‌های چند پارامتری طراحی شده برای محاسبه کیفیت خاک را با تمرکز بر روش‌های انتخاب شاخص (که به دوصورت نظر متخصص و سیستم آماری و محاسباتی است)، با یکدیگر مقایسه کردند. این روش بعدا توسط نویسندگان مختلف به کار گرفته شد. هدف اصلی این کار تعیین میزان موثر بودن نسبی چندین روش شاخص‌بندی کیفیت خاک با استفاده از ارزیابی سیستم تولید گیاهی مختلط در شمال کالیفرنیا بود. علاوه بر این آندروز و همکاران (a۲۰۰۲) بر روشی برای استانداردسازی و تبدیل شاخص‌ها از روش‌های خطی تا غیر خطی تمرکز داشت و مشخص شد که به اطلاعات عمیق‌تری از رفتار هر شاخص و تابع آن در داخل سیستم نیاز است و تبدیلات غیر خطی معرف بهتری برای کارکرد سیستم می‌باشند. آندروز و همکاران (a۲۰۰۲) نتیجه گیری کردند که هر دو روش نظر متخصص و روش آماری (که عمدتا از روش تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده می‌کند) برای انتخاب حداقل مجموعه شاخص‌ها برای تعیین کیفیت خاک در سیستم تولید گیاهی معتبر می‌باشند. محدودیت موجود برای روش‌های آماری، لازم بودن مجموعه وسیعی از داده‌هاست، که البته در صورت انتخاب یک شاخص معیین، دیگر نیاز نخواهد بود کیفیت خاک در طول زمان ارزیابی شود (ارزیابی همان شاخص کافی است). محدودیت دیگر اینکه شاخص‌های انتخاب شده از طریق سیستم آماری نسبت به روش نظر متخصص، برای تفسیر و توجیه مشکل‌تر هستند. در مطالعه مذکور شاخص-های انتخاب شده در روش نظر متخصص (فسفر محلول، pH ، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم و مواد آلی خاک) از شاخص‌های انتخاب شده با روش آماری (فسفر محلول، pH، کلسیم، سدیم و نیتروژن کل) متفاوت بود.

۱-۶-۲- رتبه‌بندی و استانداردسازی داده‌ها

پس از انتخاب دسته داده‌های حداقل، در این مرحله تبدیلاتی در خصوصیات اندازه‌گیری شده، صورت می‌گیرد و به داده‌هایی که قابل ترکیب هستند، تبدیل می‌شوند. زیرا خصوصیات مورد اندازه‌گیری دارای واحدها و مقیاس-های متفاوتی بوده و قابل جمع یا ضرب نمودن نیستند. رتبه‌دهی یا استانداردسازی داده‌ها به صورتی که به داده‌های بین صفر و یک تبدیل شوند و ترکیب آنها به صورت شاخص کیفیت خاک می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام گردد. روش رتبه‌دهی خطی[1] و رتبه‌دهی غیر خطی[2] از معمولی‌ترین روشهای رتبه‌دهی است که

[1] - linear scoring functions (LSF)
[2] - non-linear scoring functions (NLSF

بیشتر از روش رتبه‌دهی غیر خطی استفاده می‌شود به طوری که آندروز و همکاران (۲۰۰۲) این دو روش رتبه-دهی را مقایسه نمودند و دریافتند که روش رتبه‌دهی غیر خطی بهتر از روش رتبه‌دهی خطی، بیانگر عملکرد و وظایف خاک است. البته قبل از بررسی روش‌های رتبه‌دهی، لازم است توضیح داده شود که پارامترهای مختلف خاک از سه تابع زیر پیروی می‌کنند و بر اساس اینکه پارامتر مورد بررسی با کدام تابع مطابقت دارد، شکل نمودار آن در دو روش رتبه‌دهی متفاوت خواهد بود (شکل ۱-۹) و به طور کلی در نمودار این روش‌های رتبه-دهی، محور Y بین صفر تا یک رتبه‌بندی شده و محور X مقدار خصوصیات مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۹- روش‌های رتبه‌دهی به روش خطی (سمت چپ) و غیر خطی (سمت راست) برای سه تابع (ماستو و همکاران، ۲۰۰۸).

۱-۶-۲-۱- تابع هر چه بیشتر بهتر[1]

این تابع برای خصوصیاتی از خاک به کار می‌رود که افزایش آن موجب بهبود کیفیت خاک شود. نمونه بارز آن کربن آلی است که هر چه بیشتر باشد، تاثیر مثبتی بر کیفیت خاک می‌گذارد بنابراین بیشترین نمره را به خود اختصاص می‌دهد.

معادله توابع امتیازدهی استاندارد برای توابع "بیشتر بهتر"، عبارت است از:

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x<L\\ 0.9\dfrac{x-L}{U-L}+0.1 & L\le x\le U\\ 1 & x>U\end{cases}$$

که در آن $f(x)$ امتیاز مشخصه مورد بررسی است که بین ۰/۱ تا ۱ تغییر می‌کند، x مقدار مشاهده‌ای مشخصه، L حد آستانه پایین و U حد آستانه بالا است.

۱-۶-۲-۲- تابع هر چه کمتر بهتر[2]

تابعی است که هر چه مقدار ویژگی مورد بررسی افزایش یابد، امتیاز آن کاهش می‌یابد. نمونه بارز آن جرم مخصوص ظاهری است که هر چه بیشتر باشد، تاثیر منفی بر کیفیت خاک می‌گذارد بنابراین کمترین نمره را به خود اختصاص می‌دهد.

معادله توابع امتیازدهی استاندارد برای توابع "کمتر بهتر" عبارت است از:

$$f(x)=\begin{cases}1 & x<L\\ 1-0.9\dfrac{x-L}{U-L} & L\le x\le U\\ 0.1 & x>U\end{cases}$$

۱-۶-۲-۳- تابع سطح بهینه[3]

این تابع 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 در نتیجه امتیاز آن شاخص نیز کمتر می‌شود. نمونه بارز آن pH خاک است.

[1] -More is better
[2] -Less is better
[3] - Optimum

معادله توابع امتیازدهی استاندارد برای توابع "دامنه بهینه" عبارت است از:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < L_1 \; or \; x > U_2 \\ 0.9\dfrac{x - L_1}{L_2 - L_1} + 0.1 & L_1 \le x \le L_2 \\ 1 & L_2 \le x \le U_1 \\ 0.9\dfrac{x - U_1}{U_2 - U_1} + 0.1 & U_1 \le x \le U_2 \end{cases}$$

از آنجایی که اطلاعاتی از حد آستانه بالا و پایین در منطقه مورد مطالعه مختلف کشورمان وجود ندارد، لذا حداقل و حداکثر مقدار مشاهده‌ای متغیر در منطقه به ترتیب به عنوان حد آستانه پایین و بالا در نظر گرفته می‌شوند. حد آستانه بالا مقداری از متغیر می‌باشد که مقادیر بیشتر از آن، تأثیری روی کیفیت خاک ندارد. حد آستانه پایین نیز مقداری از متغیر می‌باشد که مقادیر کمتر از آن، تأثیری روی کیفیت خاک ندارد.

در روش غیر خطی برای رتبه‌دهی به پارامتر مورد بررسی، از رابطه زیر نیز استفاده می‌شود.

$$\mathrm{NLSF\ (Y)} = 1/\left[1 + e^{-b(x-A)}\right]$$

در این معادله X مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر مورد بررسی، Y رتبه غیر خطی حاصله، A مقدار پایه (که برابر با ۰/۵ می‌باشد)، b شیب منحنی است.

در روش خطی برای رتبه‌دهی، بسته به این که پارامتر مورد بررسی از کدام تابع فوق‌الذکر پیروی می‌کند، معادلات متفاوت است.

برای تابع هر چه بیشتر بهتر معادله زیر ارائه شده است:

$$Y = (x - s)/(t - s)$$

برای تابع هر چه کمتر بهتر معادله زیر ارائه شده است:

$$Y = 1 - (x - s)/(t - s)$$

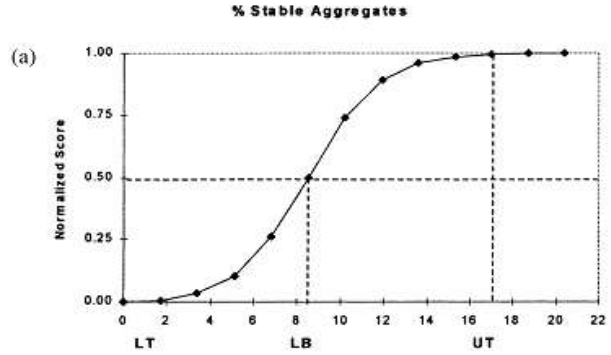
در این معادلات Y رتبه خطی حاصله، x مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر مورد بررسی و s کمترین حد آستانه و t بیشترین حد آستانه است.

برای تابع بهینه از هر دو معادله فوق استفاده می‌شود (ماستو وهمکاران، ۲۰۰۸).

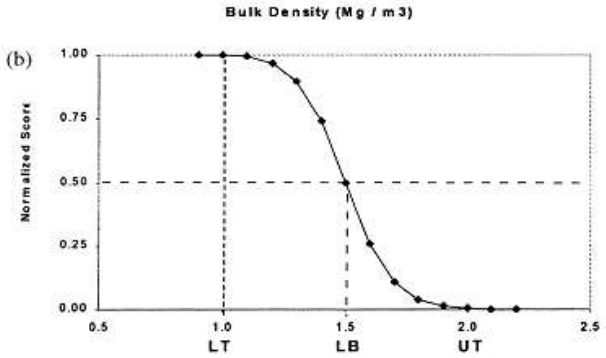
لازم به ذکر است که شکل منحنی‌های حاصل از توابع فوق بستگی به مقادیر بحرانی[1] دارد. مقادیر بحرانی شامل مقدار پایه[2]، مقدار آستانه حداقل[3] و مقدار آستانه حداکثر[4] دارد. آستانه حداکثر نقطه‌ای است که در آن مقدار تابع رتبه‌دهی برابر یک است و مقدار پارامتر در حد مطلوب است. آستانه حداقل نقطه‌ای است که در آن مقدار تابع رتبه‌دهی برابر صفر است و مقدار پارامتر در سطح غیر قابل قبول است. مقدار پایه، مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر خاک است که در آن رتبه محاسبه شده توسط معادلات (دو روش رتبه‌دهی) برابر ۰/۵ است (گلاور[5] و همکاران، ۲۰۰۰). این پارامترها در شکل ۱-۱۰ که رتبه‌دهی به روش غیر خطی را برای سه تابع مذکور انجام شده است، نشان داده شده‌اند.

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 (کم ترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) و ۱ (بیش‌ترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) نمره‌دهی می‌شود (کی و همکاران، ۲۰۰۹).

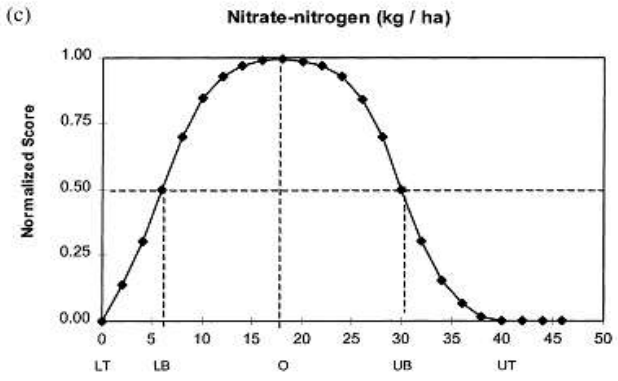
[1] - Critical values
[2] - baseline value
[3] Lower Threshold (LT)
[4] -Upper Threshold (UT)
[5] - Glover



(LT = Lower Threshold; LB = Lower Baseline; UT = Upper Threshold)



(LT = Lower Threshold; LB = Lower Baseline; UT = Upper Threshold)



(LT = Lower Threshold; LB = Lower Baseline; O = Optimal; UB = Upper Baseline; UT = Upper Threshold)

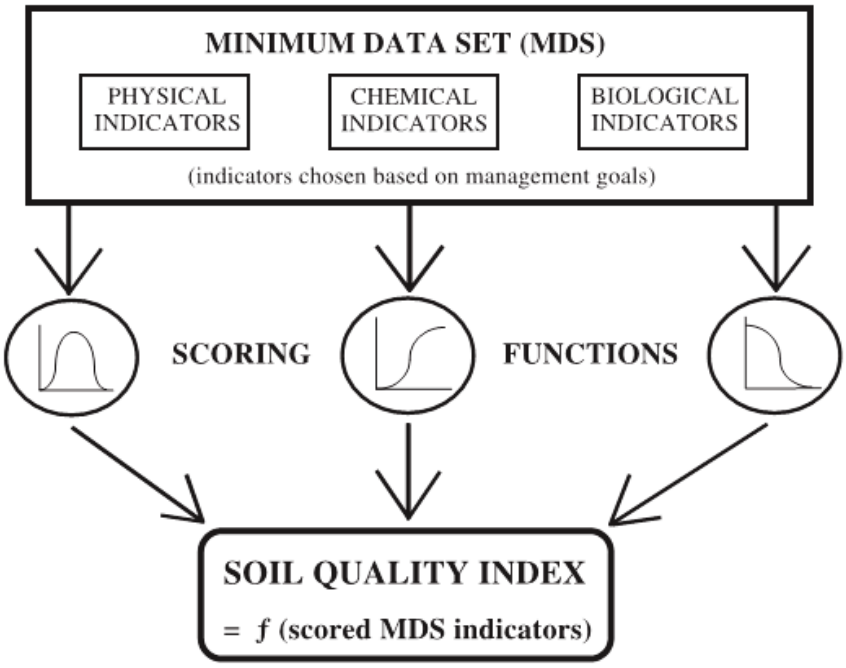
شکل ۱-۱۰- روشهای رتبه‌دهی به روش غیر خطی برای سه تابع و مشخصات هر منحنی (گلاور و همکاران، ۲۰۰۰)

آرمنیز و همکاران (۲۰۱۳) شاخص کیفیت خاک را برای اراضی کشاورزی با استفاده از توابع رتبه‌دهی و با استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی انجام دادند. آن‌ها اشاره کردند که برای انتخاب تابع مورد استفاده برای تبدیل داده‌ها، دانستن رابطه بین شاخص مورد نظر و کیفیت خاک ضروری است. عموما اگر افزایش سطح یک شاخص منجر به افزایش کیفیت خاک گردد مانند میزان ماده آلی، منحنی صعودی (هرچه بیشتر بهتر)

انتخاب می‌شود. در مقابل برای شاخص‌هایی که اثر منفی بر کیفیت خاک دارند مانند جرم مخصوص ظاهری، منحنی نزولی (هرچه کمتر بهتر) انتخاب می‌شود. در مواردی که با افزایش یک شاخص تا حد بهینه کیفیت خاک بهبود می‌یابد و بعد از آن افزایش شاخص باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردد (همانند اثر میزان رس بر کیفیت خاک) از منحنی زنگوله‌ای شکل استفاده می‌شود. بعد از انتخاب نوع منحنی برای شاخص‌ها، محدوده-های بحرانی توابع رتبه‌دهی (مقدار پایه، مقادیر آستانه‌ای و شیب خط) برای هر منطقه و هر نوع خاک (به دلیل تاثیرات شرایط ذاتی خاک، اقلیم، پوشش گیاهی و نوع گیاه یا هدف مدیریتی که باعث ایجاد تفاوت از شرایط ایده‌آل می‌شوند) بایستی مشخص گردند.

برای برخی اهداف مدیریتی، شاخصی یکسان ممکن است توابع مختلفی را در بر بگیرد و حتی به روشهای مختلفی رتبه‌دهی گردد. به عنوان مثال نیتروژن نیتراتی برای حمات از وضعیت گیاه از تابع هر چه بیشتر بهتر پیروی می‌کند، در حالی که راجع به آبشوئی از تابع هر چه کمتر بهتر پیروی می کند (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳).

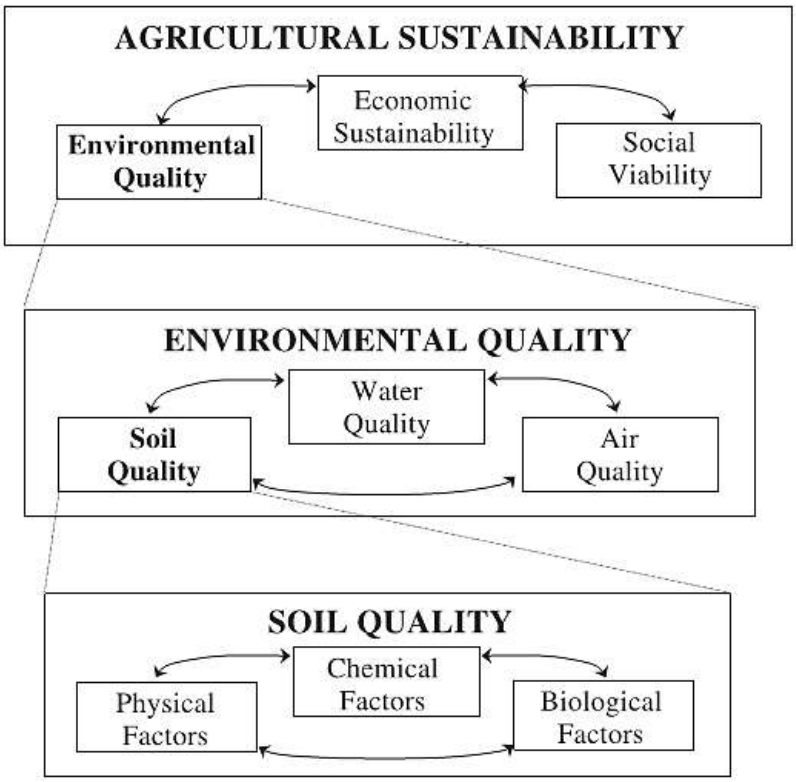
بدین ترتیب در پایان این مراحل با استفاده از روشهای آماری و ریاضی، مجموعه حداقل داده‌های مورد نیاز انتخاب می‌گردد و رتبه‌دهی و استانداردسازی آنها نیز بسته به شکل تابع برای پارامترهای مورد نظر انجام می-شود و به اعدادی بدون واحد دست پیدا می‌کنیم که این اعداد با هم تلفیق می‌شوند تا شاخص‌های مختلف کیفیت خاک حاصل گردند، که با استفاده از این شاخصها اثرات اعمال مدیریتهای مختلف در یک خاک یا روند تغییرات زمانی در همان خاک مقایسه می‌گردد (شکل ۱-۱۱).



شکل ۱-۱۱- نحوه تبدیل دسته داده‌های حداقل به شاخص کیفیت خاک (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳)

نهایتا با درک کاملی از ارزیابی پویایی کیفیت خاک، و به گفته آندروز و کارلو (۲۰۰۱)، می‌توان آن را به عنوان یکی از اجزاء مورد نیاز برای تعیین کیفیت و کمیت پایداری زیست‌بوم کشاورزی[1] پیشنهاد نمود. چرا که با تعیین کیفیت خاک، یکی از سه جزء کیفیت محیط زیست (کیفیت خاک، کیفت آب وکیفیت هوا) مشخص می-شود که خود کیفیت محیط زیست نیز یکی از سه جزء (حیات اجتماعی[2]، پایداری اقتصادی و کیفیت محیط زیست) کشاورزی پایدار محسوب می‌شود (۱-۱۲)، بنابراین بدین ترتیب کیفیت خاک در پیشرفت یک جامعه کشاورزی اهمیت دارد. تحقیقات در علوم خاک اطلاعات حیاتی را برای ارزیابی کیفیت خاک فراهم می‌کند و به نظر ما کیفیت خاک یک موضوع مهم برای پیشرفت علوم خاک است (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳).

[1] -agroecosystem
[2] -social viability



شکل ۱-۱۲- روابط سلسله مراتبی کیفیت خاک با کشاورزی پایدار (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳)

۱-۷- شاخص‌های کیفیت خاک

به دلیل این که تفسیر تعداد زیادی از متغیر و نتیجه‌گیری از آنها بسیار مشکل است، توصیه شده که مجموعه متغیرها در یک شاخص تلفیق گردند. تلفیق کردن و ایجاد شاخص به صورت جمع یا ضرب داده‌ها با یکدیگر و اعمال وزن مناسب برای هر متغیر می‌باشد. هر چند مقایسه و پایش چند سیستم به وسیله یک شاخص، ساده‌تر و قابل درک‌تر است، اما تلفیق متغیرها می‌تواند باعث حذف یا پوشیده شدن برخی از اطلاعات گردد (علی-محمدی، ۱۳۸۸).

۱-۷-۱- شاخص تجمعی

ساده‌ترین روش برای ترکیب امتیازات خصوصیات خاک و ایجاد شاخص، جمع نمودن خصوصیات استاندارد شده می‌باشد. در این روش خصوصیات موجود در حداقل داده‌های مورد نیاز، که به وسیله یکی از روش‌ها، امتیازدهی و استاندارد شده‌اند با همدیگر جمع می‌گردند.

$$SQI = \left(\sum \frac{S_i}{N}\right) \times 10$$

در این رابطه S_i امتیاز هر پارامتر حاصل از روش خطی یا غیر خطی، n تعداد شاخص‌ها یا پارامترهای اندازه-گیری شده است

مقدار عددی شاخص کیفیت خاک بین ۱ تا ۱۰ بدست می‌آید، که هر چه به ۱۰ نزدیکتر باشد نشان دهنده کیفیت مطلوب‌تر خاک است (آندروز و همکاران، ۲۰۰۳).

۱-۷-۲- شاخص تجمعی تراز شده

در این روش خصوصیات استاندارد شده موجود در حداقل داده‌های با اعمال ضریبی به عنوان وزن با هم جمع می‌شوند. به عبارت دیگر خصوصیات خاک بر اساس اهمیت آنها در فرایندهای خاک با ارزش و وزن‌های متفاوت با هم جمع شده و شاخص کیفیت خاک را ایجاد می‌نمایند. مهمترین نکته در این روش چگونگی اعمال وزن‌ها است.

$$SQI = \sum W_i \times S_i$$

در این رابطه S_i امتیاز هر پارامتر و W_i فاکتور وزنی که از برنامه‌های آماری مانند تجزیه مولفه‌های اصلی و آنالیز عامل به دست می‌آید.

۱-۷-۳- استفاده از معادلات رگرسیونی

در این روش از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} S_i \times Beta_i$$

که در آن S_i امتیاز هر پارامتر، n تعداد پارامترهای باقیمانده در معادلات رگرسیونی گام به گام و $Beta_i$ ضریب استاندارد رگرسیون پارامترهای باقیمانده است (ماستو وهمکاران، ۲۰۰۸).

۱-۷-۴- شاخص‌های چند پارامتری

اولین شاخص چند پارامتری برای کیفیت خاک احتمالا توسط کارلن و همکاران (۱۹۹۴) استفاده شده است. این نویسندگان از برنامه کاری ابداع شده توسط کارلن و استوت (۱۹۹۴) که برمبنای استفاده از توابع نمره‌دهی نرمال شده برای ارزیابی سیستم تولید موثر بر کیفیت خاک استفاده کردند. این برنامه کاری، کارکردهای انتخاب شده را به کار می‌گیرد و برطبق رابطه زیر وزن دهی کرده و جمع بندی می‌کند:

$$Q = q_{we}(wt) + q_{wt}(wt) + q_{rd}(wt) + q_{spg}(wt)$$

Q کیفیت خاک، q_{we} نرخ توانایی خاک برای انطباق ورود آب، q_{wt} نرخ توانایی خاک در تسهیل انتقال و جذب آب، q_{rd} نرخ مقاومت خاک در برابر تخریب، q_{spg} نرخ برای توانایی خاک در حمایت از رشد گیاهی و wt فاکتور وزنی برای هر کارکرد خاک (کارلن و همکاران، a۱۹۹۴). فاکتور وزنی برای هر وظیفه با توجه به اهمیت آن وظیفه برای هدف مورد ارزیابی تعیین می‌گردد. در هر سطح از ارزیابی مجموع وزنها عدد یک می‌باشد.

اگرچه این مدل به طور گسترده توسعه یافته است، اما بزرگترین مشکل روش، وابسته بودن ضرایب وزنی به نظر متخصص و استفاده نکردن از روش محاسباتی یا آماری می‌باشد. این وزن‌ها با توجه اهمیت کارکرد خاک در جهت رسیدن به هدف مورد نظر تعیین می‌گردند. با استفاده از سیستم کارلن و استوت (۱۹۹۴) و توابع مشابه، کارلن و همکاران (a۱۹۹۴) تاثیرات کاربرد مقادیر مختلف بقایا را بر کیفیت طولانی مدت خاک در کشت ذرت بررسی کردند و نشان دادند که وجود بقایای گیاهی تاثیر مثبتی بر کیفیت خاک دارد. در این تحقیق تخلخل به عنوان شاخص توانایی خاک برای انطباق ورود آب، جمعیت کرم خاکی به عنوان نماینده تعداد منافذ درشت، خاکدانه‌های پایدار در آب برای انعکاس توانایی خاک برای مقاومت در برابر تخریب، انتخاب شدند. کارلن و همکاران (a۱۹۹۴) با استفاده از پارامترهای متنوع فیزیکی و شیمیایی و زیستیکی اهمیت زیادی به روابط آب دادند. مقادیر پارامترها با استفاده از توابع نمره‌دهی استاندارد بین ۰ تا ۱ استاندارد شدند. اما فاکتورهای وزن-دهی به صورت ذهنی انجام شد و نویسندگان از هیچ روش محاسباتی استفاده نکردند. همانگونه که نویسندگان نیز اشاره کرده بودند هدف اصلی مقاله نشان دادن روشی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک بود تا ارائه یک ابزار تعریف شده برای ارزیابی‌های محیطی، و از این نظر با توجه به استفاده گسترده‌ای که از آن به عمل آمد در رسیدن به هدف خود کاملا موفق بود. کارلن و همکاران (b۱۹۹۴) این شاخص را برای ارزیابی تاثیرات شخم بر کیفیت خاک به کار بردند و نشان دادند که نبود شخم باعث افزایش کیفیت خاک می‌گردد.

ماستو و همکاران (۲۰۰۷) با یک مدل مشابه با مدل کارلن، برای کارکرد مقاومت در برابر تخریب بیوشیمیایی، یک شاخص کیفیت خاک با هدف ارزیابی اثرات طولانی مدت کوددهی (کودهای شیمیایی) توسعه دادند. این شاخص نشان داد که خاک‌هایی که در معرض کودهای غیرآلی و تیمارهای مواد اصلاحی آلی بودند، شاخص‌های بزرگتری نسبت به خاک‌هایی داشتند که هیچ نهاده‌ای دریافت نکرده بودند. نوآوری این مطالعه محاسبه شاخص کیفیت خاک بدون استفاده از فاکتور وزن بود که نشان داد که استفاده از این فاکتورها بر رتبه‌بندی نسبی تیمارهای خاص اثر ندارد، که این نکته قبل از آن نیز توسط آندروز و همکاران (a۲۰۰۲) نیز گزارش شده بود (باستیدا و همکاران، ۲۰۰۸). با استفاده از روش ابداع شده توسط کارلن واستوت (۱۹۹۴) و کارلن و همکاران

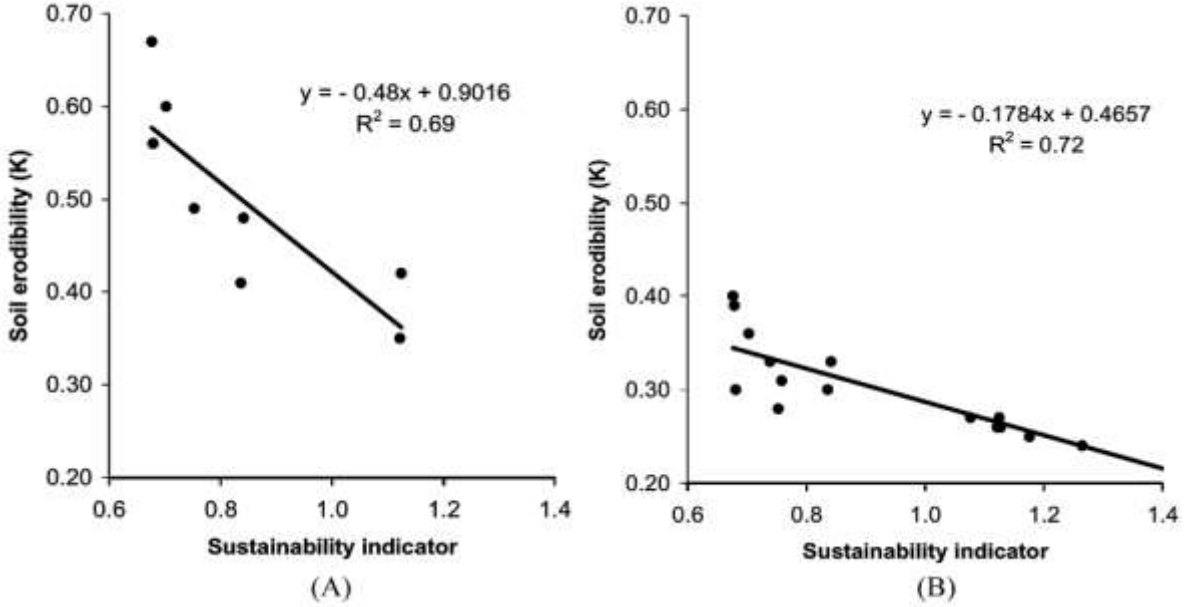
(a۱۹۹۴) و توابع مشابه کیفیت، گلاور[1] و همکاران (۲۰۰۰) یک شاخص که تاثیرات مدیریت ویژه را بر کیفیت خاک منعکس کند، ابداع کردند. این نویسندگان نشان دادند که سیستم تولیدی جمع بندی شده منجر به مقدار کیفیت خاک بزرگی می‌شود.

۱-۷-۵- شاخص پایداری (SI)

برخی از ویژگی های فیزیکی خاک که به عنوان شاخص کیفیت خاک مطرح شده‌اند عبارتند از ظرفیت آب قابل استفاده گیاه[2]، شاخص پایداری ساختمان خاک، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل تهویه‌ای، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های پایدار در آب و شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف. گومز و همکاران (۱۹۹۶)، به منظور تعیین پایداری خاک در سیستم‌های مختلف کشاورزی، روشی براساس اندازه‌گیری شاخص‌های فیزیکی خاک پیشنهاد کردند. این روش شاخص پایداری[3](SI) است که در آن پنج ویژگی خاک شامل عمق خاک، درصد کربن آلی، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه به عنوان شاخص‌های کیفیت فیزیکی مؤثر بر پایداری سیستم خاک در نظر گرفته می‌شوند و میانگین عددی آنها به عنوان شاخص پایداری اطلاق می‌گردد (سینگ و خرا، ۲۰۰۹). برای تعیین شاخص پایداری خاک به این صورت عمل می‌شود که مقدار هر کدام از پنج ویژگی خاک شامل عمق خاک، میزان کربن آلی، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه به مقدار آستانه این ویژگی‌ها از نظر پایداری خاک تقسیم می-شود. سپس با محاسبه میانگین حسابی اعداد به دست آمده، شاخص پایداری خاک (SI) تعیین می‌گردد. مقادیر آستانه در نظر گرفته شده برای عمق خاک ۵۰ سانتی‌متر یا میانگین معمول در منطقه، هرکدام بیشتر باشد، کربن آلی یک درصد یا میانگین معمول در منطقه، هر کدام بیشتر باشد، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب بر حسب میانگین معمول در منطقه، جرم ویژه ظاهری بر حسب میانگین معمول در منطقه و ظرفیت آب قابل استفاده گیاه بر حسب میانگین معمول در منطقه می باشد (سینگ و خرا، ۲۰۰۹). ارزش هر پارامتر اگر برابر یا بیشتر از یک باشد، نشان دهنده تاثیر مثبت آن پارامتر بر پایداری سیستم مورد استفاده است، در حالی که مقادیر کمتر از یک نشان می‌دهد که آن پارامتر نقش کاهشی در پایداری سیستم با استفاده خاص دارد. اگر در سیستمی میانگین شاخص‌های پایداری[4] ارزشی کمتر از یک داشته باشند، راجع به فرسایش پذیری خاک، به عنوان ناپایدار[5] نامیده می‌شود. در شکل ۱-۱۳ ضریب همبستگی بین میانگین شاخص پایداری (SI) و فرسایش-

[1] -Glover
[2] - Plant Available Water Capacity (PAWC)
[3] - Sustainability index
[4] -mean sustainability indices
[5] -non sustainable (NS)

پذیری خاک (K) تحت شرایط بارش طبیعی (A) و شبیه‌سازی شده (B) نشان داده شده است. هر چه شاخص پایداری بیشتر باشد، میزان فرسایش‌پذیری کمتر خواهد بود.



شکل ۱-۱۳- رابطه شاخص پایداری و فرسایش‌پذیری خاک در شرایط بارش طبیعی (A) و شبیه‌سازی شده (B) (سینگ و خرا، ۲۰۰۹).

سینگ و خرا (۲۰۰۹) شاخص پایداری را با فرسایش‌پذیری خاک در کاربری‌های مختلف اراضی در چهار منطقه مختلف در هندوستان بررسی نمود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری پنج شاخص فیزیکی مورد استفاده جهت محاسبه شاخص پایداری در جدول ۱-۳ و شاخص‌های پایداری[1] مربوط به هر پارامتر و در نهایت شاخص پایداری (SI) هر کاربری اراضی در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

[1] - Sustainability indices

جدول ۱-۳- شاخص‌های فیزیکی مورد استفاده در شاخص پایداری (SI) در کاربریهای مختلف اراضی چهار منطقه مورد مطالعه (سینگ و خرا، ۲۰۰۹)

		Indicators				
Location	Land use	Soil depth (cm)	OC (%)	WSA > 2.0 mm (%)	BD ($Mg\,m^{-3}$)	AWHC (%)
Ballowal	Barren	160	0.34	2.1	1.46	7.2
Saunkhri-I	Cultivated	170	0.36	5.3	1.43	7.9
	Grassland	170	0.41	14.6	1.49	6.5
	Forest	165	1.18	18.9	1.11	7.8
Ballowal	Barren	170	0.31	2.1	1.45	6.5
Saunkhri-II	Cultivated	170	0.33	4.0	1.44	6.5
	Grassland	170	0.57	12.9	1.43	5.8
	Forest	170	1.52	19.8	1.24	5.0
Kokowal	Barren	15	0.49	35.3	1.48	18.1
Majari	Cultivated	56	0.49	38.6	1.37	17.1
	Grassland	33	0.74	41.8	1.34	18.8
	Forest	20	1.27	46.1	1.30	19.3
Saleran	Barren	170	0.32	3.2	1.46	9.0
	Cultivated	175	0.32	5.4	1.44	8.2
	Grassland	67	0.47	10.0	1.42	8.5
	Forest	150	1.65	16.3	1.43	8.9
Mean		126.9	0.70	17.3	1.40	10.1
Threshold		126.9	1.00	17.3	1.40	10.1
SD		63.1	0.46	15.1	0.10	5.06
CD(0.05)	Location	9.1	0.04	1.28	0.02	0.44
	Land use	NS	0.06	1.93	0.04	0.29

OC: organic carbon; WSA: water stable aggregates; BD: bulk density; AWHC: available water-holding capacity; number of replications: 3; SD: standard deviation; CD (0.05): critical difference at 5% level of significance; NS: nonsignificant differences.

جدول ۱-۴- شاخص‌های پایداری مربوط به هر پارامتر و شاخص پایداری (SI) برای کاربریهای مختلف اراضی چهار منطقه مورد مطالعه (سینگ و خرا، ۲۰۰۹)

Location	Land use	Indices					Mean	Sustain-ability
		Soil depth	OC	WSA	BD	AWHC		
Ballowal Saunkhri-I	Barren	1.26	0.34	0.12	0.96	0.71	0.68	NS
	Cultivated	1.34	0.36	0.31	0.98	0.78	0.75	NS
	Grassland	1.34	0.41	0.84	0.94	0.65	0.84	NS
	Forest	1.30	1.18	1.09	1.26	0.77	1.12	1.12
Ballowal Saunkhri-II	Barren	1.34	0.31	0.12	0.97	0.64	0.68	NS
	Cultivated	1.34	0.33	0.23	0.97	0.64	0.70	NS
	Grassland	1.34	0.57	0.75	0.98	0.57	0.84	NS
	Forest	1.34	1.52	1.14	1.13	0.49	1.12	1.12
Kokowal Majari	Barren	0.12	0.49	2.04	0.95	1.79	1.08	1.08
	Cultivated	0.44	0.49	2.23	1.02	1.70	1.18	1.18
	Grassland	0.26	0.74	2.42	1.04	1.86	1.27	1.27
	Forest	0.16	1.27	2.66	1.08	1.91	1.42	1.42
Saleran	Barren	1.34	0.32	0.18	0.96	0.89	0.74	NS
	Cultivated	1.38	0.32	0.31	0.97	0.81	0.76	NS
	Grassland	0.53	0.47	0.58	0.99	0.84	0.68	NS
	Forest	1.18	1.65	0.94	0.98	0.88	1.13	1.13

OC: organic carbon; WSA: water stable aggregates; BD: bulk density; AWHC: available water-holding capacity.

این نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه کاربری‌های مختلف، درصد کربن آلی و درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (بزرگتر از ۲ میلی‌متر)، در کاربری جنگل و مرتع به ترتیب بالاترین مقدار بود. در منطقه Ballowal Saunkhri ناحیه اول و Ballowal Saunkhri ناحیه دوم، تمامی شاخص‌های فیزیکی به جز ظرفیت آب قابل استفاده گیاه، در کاربری جنگل بالاتر از مقدار آستانه هستند و برای دیگر کاربری‌ها همه شاخص‌های فیزیکی به جز عمق خاک کمتر از مقدار آستانه است. همچنین در منطقه Ballowal Saunkhri ناحیه اول، Ballowal Saunkhri ناحیه دوم و منطقه Saleran مقدار شاخص پایداری (SI) تنها در کاربری جنگل بالاتر از یک بوده و نشان دهنده پایداری این کاربری است و در منطقه Kokowal Majari در هر چهار کاربری مقدار شاخص پایداری (SI) بالاتر از یک است.

۱-۷-۶- شاخص رتبه تجمعی (CR)

روش دیگر برای تعیین پایداری خاک بر اساس شاخص‌های کیفیت فیزیکی، توسط شوکلا و همکاران (۲۰۰۴) ارائه شده که به روش رتبه تجمعی[1] (CR) معروف است. برای این منظور ۱۱ ویژگی خاک شامل EC، pH، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA)، ظرفیت نگهداری آب[2] (WHC)، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، میزان نفوذپذیری[3]، هدایت هیدرولیکی اشباع[4] و میزان کربن آلی در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر هر شاخص (تمام شاخص‌های اندازه‌گیری شده) بر اساس حدود بحرانی[5] ارائه شده توسط لال (۱۹۹۴) (جدول ۱-۵) به پنج گروه بدون محدودیت، محدویت کم، متوسط، شدید و خیلی شدید تقسیم و به هر گروه به ترتیب نمره ۱ تا ۵ اختصاص می‌یابد (عمل وزن‌دهی نسبی[6])، به طوری که نمره ۱ به گروه دارای بیشترین کیفیت (بدون محدودیت) و ۵ به گروه دارای کمترین کیفیت (محدودیت خیلی شدید) تعلق می‌گیرد (جدول ۱-۶). در نهایت مجموع نمرات اختصاص یافته به شاخص-های مختلف کیفیت خاک (۱۱ شاخص) به عنوان شاخص رتبه تجمعی (CR) در نظر گرفته می‌شود. با افزایش مقدار شاخص رتبه تجمعی (CR)، پایداری خاک کاهش می‌یابد. به طوری که اگر مقدار شاخص رتبه تجمعی بیش از ۴۰ باشد، خاک در وضعیت ناپایداری به سر می‌برد و اگر مقدار شاخص رتبه تجمعی کمتر از ۲۰ باشد، خاک بسیار پایدار است.

[1] -Cumulative rating
[2] - Water-Holding Capacity (WHC)
[3] - Infiltration Rate (IR)
[4] - saturated hydraulic conductivity
[5] - Critical levels
[6] - Relative Weighting Factor (RWF)

جدول ۱-۵- شاخص مورد استفاده جهت محاسبه شاخص رتبه تجمعی (CR) و نحوه امتیاز بندی بر اساس حدود بحراني ارائه شده توسط لل (۱۹۹۴)، (سینگ و خرا، ۲۰۰۹)

Limitation	RWF	F_a (cm^3 cm^{-3})	AWHC (cm)	IR ($cm\,h^{-1}$)	K_s ($cm\,h^{-1}$)	OC ($Mg\,ha^{-1}$)	BD ($Mg\,m^{-3}$)
None	1	>0.20	>30	>5	>2	70–130	<1.3
Slight	2	0.18–0.20	20–30	2–5	0.2–2	45–70	1.3–1.4
Moderate	3	0.15–0.18	8–20	1–2	0.02–0.2	14–45	1.4–1.5
Severe	4	0.10–0.15	2–8	0.5–1	0.002–0.02	7.5–14	1.5–1.6
Extreme	5	<0.10	<2	<0.5	<0.002	<7.5	>1.6

Limitation	RWF	WSA ($g\,kg^{-1}$)	MWD (mm)	Texture	EC ($dS\,m^{-1}$)	pH
None	1	>750	>2.5	loam	<3	6–7
Slight	2	500–750	2–2.5	SiL, Si, SiCL	3–5	5.8–6 & 7–7.4
Moderate	3	250–500	1–2	CL, SL	5–7	5.4–5.8 & 7.4–7.8
Severe	4	50–250	0.5–1	SiC, LS	7–10	5.0–5.4 & 7.8–8.2
Extreme	5	<50	<0.5	C, S	>10	<5.0 & >8.2

F_a: porosity; AWHC: available water-holding capacity; IR: infiltration rate; K_s: saturated hydraulic conductivity; OC: organic carbon; BD: bulk density; WSA: water stable aggregates; MWD: mean weight diameter; EC: electrical conductivity.

جدول ۱-۶- وضعیت پایداری خاک بر اساس میزان نمره شاخص رتبه تجمعی ارائه شده توسط لل(۱۹۹۴)، (سینگ و خرا، ۲۰۰۹)

Sustainability		RWF	CR
Highly sustainable	(HS)	1	<20
Sustainable	(S)	2	20–25
Sustainable with high input	(SWHI)	3	25–30
Sustainable with another land use	(SWALU)	4	30–40
Unsustainable	(US)	5	>40

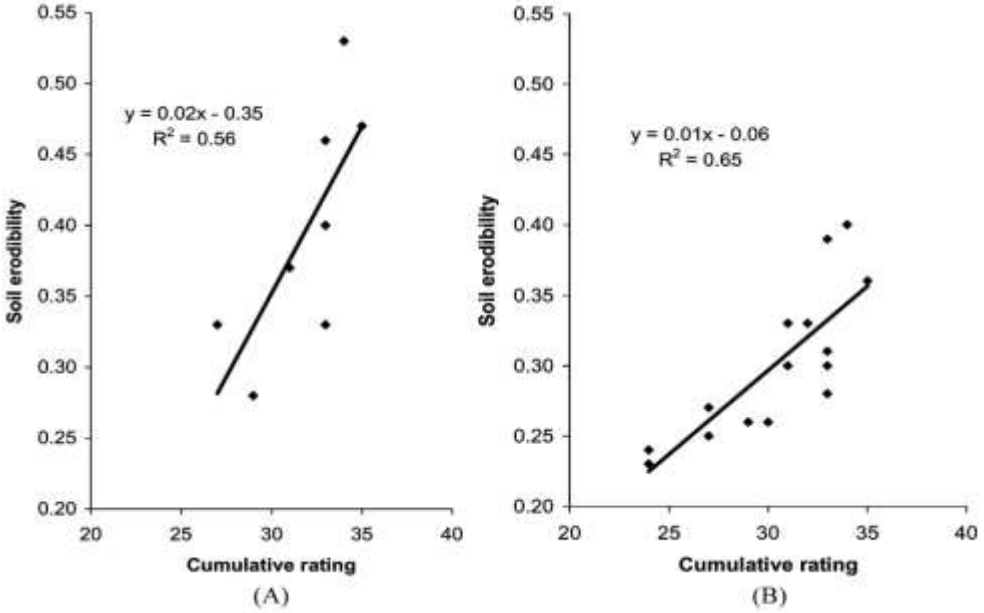
سینگ و خرا (۲۰۰۹)، رابطه شاخص رتبه تجمعی (CR) را با فرسایش‌پذیری خاک درکاربری‌های مختلف اراضی در چهار منطقه هندوستان بررسی نمودند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ۱۱ شاخص مورد استفاده جهت محاسبه شاخص رتبه تجمعی در جدول ۱-۷ ارائه شده است. میزان شاخص رتبه تجمعی (CR) برای تمامی کاربری‌های مورد بررسی در چهار منطقه، از ۲۴ تا ۳۴ متغیر است و بدین ترتیب هیچ کدام از کاربری‌ها، ناپایدار نیستند.

جدول ۱-۷- شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و نمره اختصاص یافته به هر کدام (داخل پرانتز) و شاخص رتبه تجمعی (CR) مربوط به هر کاربری در چهار منطقه مورد بررسی (سینگ و خرا، ۲۰۰۹).

Location	Land use	F_a ($cm^3 cm^{-3}$)	AWHC (cm)	IR ($cm\,h^{-1}$)	K_s ($cm\,h^{-1}$)	OC ($Mg\,ha^{-1}$)	BD ($Mg\,m^{-3}$)	WSA ($g\,kg^{-1}$)	MWD (mm)	Texture	EC ($dS\,m^{-1}$)	pH	CR	Sustainability as explained in Table 4
BS-I	B	28.1(1)	5.2(4)	6.5(1)	4.5(1)	7.62(4)	1.46(3)	21.2(5)	0.38(5)	ls(4)	0.21(1)	8.0(4)	33	SWALU
	C	29.9(1)	6.3(4)	1.6(3)	2.5(1)	8.06(4)	1.43(3)	53.5(4)	0.43(5)	sl(3)	0.21(1)	8.2(4)	33	SWALU
	G	28.5(1)	5.5(4)	7.7(1)	7.6(1)	9.18(4)	1.49(3)	14.5(5)	0.66(4)	sl(4)	0.13(1)	8.4(5)	33	SWALU
	F	31.4(1)	6.7(4)	9.2(1)	6.9(1)	26.43(3)	1.11(1)	18.8(5)	0.82(4)	ls(4)	0.34(1)	8.1(4)	29	SWHI
BS-II	B	28.7(1)	5.5(4)	11.4(1)	5.9(1)	6.94(5)	1.45(3)	20.9(5)	0.33(5)	ls(4)	0.17(1)	8.0(4)	34	SWALU
	C	27.3(1)	5.5(4)	9.8(1)	5.7(1)	7.39(5)	1.44(3)	38.9(5)	0.33(5)	ls(4)	0.14(1)	8.3(5)	35	SWALU
	G	26.8(1)	4.8(4)	8.6(1)	6.3(1)	12.77(4)	1.43(3)	129.2(4)	0.78(4)	ls(4)	0.23(1)	7.9(4)	31	SWALU
	F	29.2(1)	3.8(4)	12.4(1)	7.3(1)	34.05(3)	1.24(1)	191.1(4)	0.96(4)	sl(3)	0.32(1)	8.0(4)	27	SWHI
KM	B	36.2(1)	18.1(3)	0.5(4)	0.5(2)	10.98(4)	1.48(3)	352.5(3)	1.48(3)	l(1)	0.22(1)	7.2(2)	27	SWHI
	C	35.5(1)	17.1(3)	0.3(5)	0.5(2)	10.98(4)	1.37(2)	386.3(3)	1.59(3)	l(1)	0.20(1)	7.2(2)	27	SWHI
	G	37.4(1)	18.8(3)	1.2(3)	0.6(2)	16.58(3)	1.34(2)	418.1(3)	1.73(3)	l(1)	0.23(1)	7.4(2)	24	S
	F	39.0(1)	19.3(3)	1.5(3)	0.7(2)	28.45(3)	1.30(2)	460.7(3)	1.75(3)	l(1)	0.24(1)	7.2(2)	24	S
Sa	B	28.9(1)	6.2(4)	10.9(1)	5.3(1)	7.17(5)	1.46(3)	32.1(3)	0.37(5)	ls(4)	0.23(1)	7.8(4)	32	SWALU
	C	27.9(1)	7.1(4)	11.5(1)	5.2(1)	7.17(5)	1.44(3)	53.7(4)	0.44(5)	ls(4)	0.22(1)	7.8(4)	33	SWALU
	G	29.7(1)	7.4(4)	12.7(1)	6.3(1)	10.53(4)	1.42(3)	100.4(4)	0.52(4)	ls(4)	0.19(1)	8.1(4)	31	SWALU
	F	31.4(1)	7.7(4)	12.9(1)	7.5(1)	36.96(3)	1.43(3)	162.7(4)	0.77(4)	ls(4)	0.25(1)	8.0(4)	30	SWHI
Mean		31.0	9.1	7.4	4.6	15.08	1.39	153.4	0.83		0.22	7.9	30.2	
SD		3.9	5.6	4.8	2.7	10.32	0.10	159.9	0.52		0.05	0.4	3.5	
CD	Location	0.82	0.23	1.53	0.23	0.90	0.02	12.8	0.05		NS	0.14		
(0.05)	Land use	1.53	0.20	2.03	0.23	1.34	0.04	19.3	0.06		0.02	0.09		

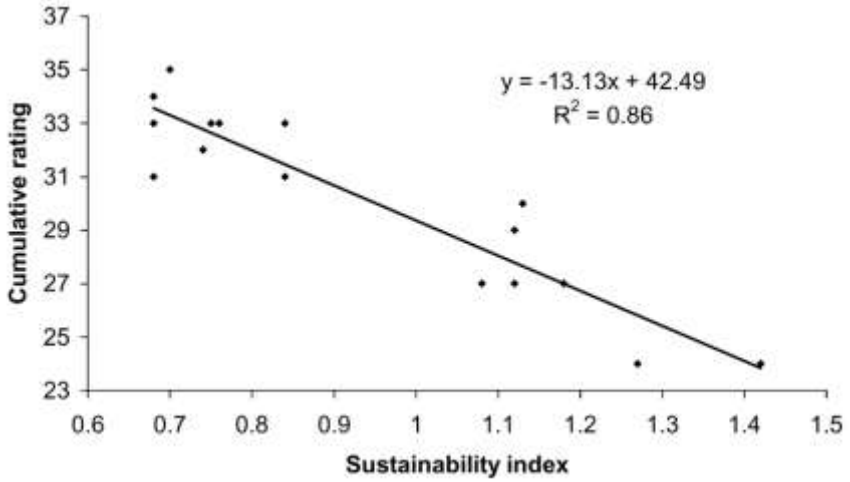
BS: Ballowal Saunkhri; KM: Kokowal Majari; Sa: Saleran; B: barren; C: cultivated; G: grassland; F: forest; Fa = porosity; AWHC: available water-holding capacity; IR: infiltration rate; Ks: saturated hydraulic conductivity; OC: organic carbon; BD: bulk density; WSA: water stable aggregates; MWD: mean weight diameter; EC: electrical conductivity; CR: cumulative rating; l = loam; ls: loamy sand; sl: sandy loam; number of replications: 3; SD: standard deviation; CD (0.05): critical difference at 5% level of significance; NS: nonsignificant differences.

همچنین شاخص رتبه تجمعی (CR) با فرسایش پذیری خاک (K) در هر دو حالت تحت شرایط بارش طبیعی (A) و شبیه‌سازی شده (B)، همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد (شکل ۱-۱۴).



شکل ۱-۱۴- رابطه شاخص رتبه تجمعی و فرسایش‌پذیری خاک در شرایط بارش طبیعی (A) و شبیه‌سازی شده (B) (سینگ و خرا، ۲۰۰۹).

بنابراین از دو شاخص رتبه تجمعی (CR) و شاخص پایداری (SI) برای تعیین پایداری فیزیکی خاک استفاده می‌شود که هر دو با فرسایش‌پذیری خاک در ارتباط هستند. به طوری که هر چه شاخص رتبه تجمعی (CR) افزایش یابد، فرسایش پذیری خاک نیز افزایش می‌یابد، اما هر چه شاخص پایداری (SI) افزایش یابد، فرسایش پذیری خاک کاهش می‌یابد (شکل ۱-۱۳ و ۱-۱۴). بنابراین این دو شاخص نیز با همدیگر همبستگی منفی دارند به طوری که هر چه شاخص پایداری (SI) افزایش یابد بیانگر بهبود کیفیت خاک است و هر چه رتبه تجمعی (CR) افزایش یابد، بیانگر تنزل کیفیت خاک می‌باشد (شکل ۱-۱۵) (سینگ و خرا، ۲۰۰۹).



شکل ۱-۱۵- رابطه شاخص رتبه تجمعی و شاخص پایداری(سینگ و خرا، ۲۰۰۹).

۱-۷-۷- شاخص کیفیت تجمعی (IQI)

در کاربریهای کشاورزی و زیست محیطی، دو مدل شاخص کیفیت تجمعی (IQI)[1]، و شاخص کیفیت نمرو (NQI)[2] نیز برای تعیین کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (دوران و پارکین ۱۹۹۴ ، هان و وو ۱۹۹۴ و کویین و ژاو ۲۰۰۰). در این مدل‌ها مجموعه‌ای از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک مدل ریاضی با هم ترکیب و به صورت یک کمیت عددی ارائه می‌گردند که این عدد به عنوان شاخص کلی کیفیت خاک، منعکس کننده مجموعه‌ی ویژگی‌های مورد نظر می‌باشد (کی و همکاران، ۲۰۰۹). هرکدام از این دو مدل با استفاده از دو مجموعه ویژگی های خاک، شامل دسته کل داده ها (TDS) و دسته داده‌های حداقل (MDS) محاسبه می‌شوند.

[1] -Integrated quality index
[2]- Nemero quality index

در مدل شاخص کیفیت تجمعی با استفاده از توابع امتیازدهی استاندارد[1] برای هر مشخصه یک امتیاز تعیین شده و از مجموع حاصل ضرب امتیاز هر مشخصه در ضریب وزنی آن، مقدار شاخص IQI محاسبه می‌شود. این عمل توسط یک معادله ساده صورت گرفته و در قالب یک شاخص ارائه می شود.

$$IQI = \sum_{i=1}^{n} W_i N_i$$

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.

وزن مربوط به هر مشخصه از طریق محاسبه واریانس مشترک[2] متغیرها بدست می‌آید. بدین منظور از طریق تحلیل اجزاء اصلی، واریانس مشترک متغیرها استخراج و از نسبت واریانس مشترک هر متغیر به مجموع واریانس مشترک کل متغیرها، وزن مربوط به هر متغیر محاسبه می‌گردد (کی و همکاران، ۲۰۰۹). واریانس مشترک بیشتر بدین معنی است که نسبت بیشتری از واریانس به وسیله آن عامل توضیح داده می‌شود لذا وزن بیشتری به آن اختصاص داده می‌شود. برای تعیین امتیاز نیز، به دلیل واحدهای متفاوت اندازه‌گیری متغیرها از توابع امتیازدهی استاندارد استفاده شد. بدین منظور ابتدا متغیرها در سه گروه توابع "بیشتر بهتر"، "کمتر بهتر" و "دامنه بهینه" دسته‌بندی شده و با استفاده از توابع امتیازدهی استاندارد، امتیاز هر مشخصه محاسبه می‌گردد.

۱-۷-۸- شاخص کیفیت نمرو (NQI)

در مدل شاخص کیفیت نمرو (NQI) که اساس آن استفاده از مقادیر میانگین و حداقل ویژگی‌ها است، وزن ویژگی‌های خاک استفاده نمی‌شود. نتایج این شاخص بستگی به مقدار حداقل ویژگی‌ها داشته و منعکس کننده قانون حداقل در تولید محصول می باشد.

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

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

کی و همکاران (۲۰۰۹)، کیفیت خاک را بر مبنای شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمرو در دو مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها در ۴۳۱ نمونه در مقیاس منطقه‌ای بررسی نمودند و به عنوان یک نتیجه کیفیت خاک را به صورت جدول ۱-۱۶ طبقه بندی نمودند. محققانی در داخل کشور از جمله قائمی و همکاران

1 - Standard Scoring Function (SSF)
2 - Communality

(۱۳۹۲)، شهاب و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقات خود برای طبقه‌بندی کیفیت خاک از آن استفاده نمودند، هر چند ممکن است این محدوده‌های در نظر گرفته برای کلاس‌بندی، در کشورمان متفاوت با این طبقه‌بندی باشد.

جدول ۱-۱۶- طبقه بندی کیفیت خاک بر مبنای شاخص‌های IQI و NQI در دو دسته کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل ارائه شده توسط کی و همکاران (۲۰۰۹)

شاخص کیفیت خاک	روش انتخاب خصوصیات	درجه کیفیت خاک			
		I	II	III	IV
IQI	TDS	$IQI_{TDS} \geq$ ۰/۷۶	۰/۷۶> $IQI_{TDS} \geq$ ۰/۶۶	۰/۶۶> $IQI_{TDS} \geq$ ۰/۵۶	۰/۵۶> IQI_{TDS}
	MDS	$IQI_{MDS} \geq$ ۰/۷۸	۰/۷۸> $IQI_{MDS} \geq$ ۰/۶۸	۰/۶۸> $IQI_{MDS} \geq$ ۰/۵۸	۰/۵۸> IQI_{MDS}
NQI	TDS	$NQI_{TDS} \geq$ ۰/۵۵	۰/۵۵> $NQI_{TDS} \geq$ ۰/۴۵	۰/۴۵> $NQI_{TDS} \geq$ ۰/۳۵	۰/۳۵> NQI_{TDS}
	MDS	$NQI_{MDS} \geq$ ۰/۸۰	۰/۸۰> $NQI_{MDS} \geq$ ۰/۷۰	۰/۷۰> $NQI_{MDS} \geq$ ۰/۶۰	۰/۶۰> NQI_{MDS}

شهاب و همکاران (۱۳۹۱)، با هدف بررسی تأثیر کیفیت خاک بر پایداری آن، رابطه بین مدل‌های تعیین کیفیت و شاخص‌های پایداری خاک را در زمین‌های کشاورزی و مرتعی جنوب مشهد، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های کیفیت خاک (IQI و NQI) دارای همبستگی معنی‌داری با شاخص‌های پایداری خاک (SI و CR) بودند و این گونه نتیجه‌گیری کردند که در منطقه مورد مطالعه کیفیت خاک تأثیر مهمی بر فرسایش و در نتیجه پایداری خاک در زیست بوم دارد. لذا به منظور پیشگیری از تخریب خاک لازم است استفاده از زمین به گونه‌ای باشد که شاخص‌های کیفیت خاک را در حد مطلوب حفظ نماید.

رحمانی‌پور و همکاران (۱۳۹۱) کیفیت خاک را با استفاده از شاخص IQI و تغییرات مکانی آن را در بخشی از نواحی کشاورزی استان قزوین ارزیابی کردند. پس از محاسبه شاخص IQI در منطقه، توزیع مکانی آن با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی در سامانه اطلاعات جغرافیایی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نقشه کیفیت خاک حاصل از شاخص IQI 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.

۱-۷-۹- شاخص نقطه عطف منحنی رطوبتی (S_i)

کیفیت فیزیکی خاک به شکل‌های مختلفی مشخص می‌شود. هنگامی که خاک‌ها یک یا چند مورد از خصوصیات زیر را نشان دهند کیفیت فیزیکی ضعیفی دارند: قابلیت کم نفوذ آب در خاک، رواناب سطحی، سخت شدگی،

تهویه ضعیف، قابلیت ریشه‌دوانی ضعیف و کارپذیری ضعیف[1] در خاک (دکستر، a۲۰۰۴). از دهه ۱۹۵۰ ویژگی‌ها یا رفتارهای مختلف خاک به عنوان شاخص‌های کیفی مورد استفاده قرار گرفته است، شاید مهمترین آنها میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها باشد، چرا که توصیف کمی از ساختمان خاک است و ساختمان خاک نیز بسیاری از خصوصیات خاک از جمله وضعیت تخلخل و در نتیجه خصوصیات فوق‌الذکر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. گویریف و همکاران (۲۰۰۱) تخلخل خاک را به دو بخش ساختمانی و بافتی تقسیم کردند. تخلخل بافتی شامل منفذ ریز و منافذ زیستی، اما تخلخل ساختمانی، منافذ درشت است که در اثر خاک‌ورزی به وجود می‌آیند. نامبردگان تخلخل ساختمانی را بسیار حساس به مدیریت خاک‌های زراعی دانسته‌اند. دکستر (a۲۰۰۴) با توجه به تاثیرپذیری عمیق منحنی رطوبتی از اندازه و آرایش منافذ خاک و با تمرکز به این مسئله طی تحقیقات پایه‌ای جالب نشان داد که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن (S) می‌تواند منعکس کننده جنبه‌های مختلف کیفیت خاک از قبیل نفوذ، سخت شدگی و فشردگی باشد. دکستر (b۲۰۰۴) بر اساس اطلاعات جمع آوری شده از خاک در هفت کشور که مقادیر رس آنها بین ۴ تا ۷۳ درصد بود کلاس‌های زیر را برای شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد کرد: S<۰/۰۲ خیلی ضعیف، ۰/۰۲< S <۰/۰۳۵ ضعیف، S >۰/۰۳۵ خوب. رسم نقشهٔ خطوط هم تراز S برای نشان دادن مناطقی که مدیریت خاصی را لازم دارند، مفید می باشد. همچنین تغییرات کیفی خاک‌ها با گذشت زمان با استفاده از شاخصS و طبقه‌بندی فوق‌الذکر قابل ارزیابی می‌باشد. بنابراین شاخص S می‌تواند یک ابزار ارزشمند در کمی‌سازی تخریب فیزیکی خاک یا بهبود آن و در ارزیابی کیفیت فیزیکی منابع جهانی خاک باشد دکستر (b۲۰۰۴).

برای محاسبه سریع شاخص S نیاز به مشخص بودن معادله منحنی رطوبتی است. هر چند می‌توان شاخص S را به طور مستقیم از روی منحنی رطوبتی به دست آورد، اما روش مطمئن‌تر برازش یک تابع مناسب به داده‌های آزمایشگاهی منحنی رطوبتی و سپس محاسبه شاخص S از روی توابع برازش یافته است. برای این منظور معمولا تابع ون‌گنوختن به علت استفاده گسترده آن و در دسترس بودن آسان نرم افزار RETC برای برازش منحنی به داده‌های آزمایشگاهی منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توابع انتقالی متعددی نیز برای تخمین پارامترهای آن وجود دارند.

معادلات زیر مقدار شیب در نقطه عطف منحنی رطوبتی را به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از پارامترهای معادله وان گنوختن (۱۹۸۰) نشان می‌دهند.

تابع ون‌گنوختن برای منحنی رطوبتی عبارت است از (معادله ۱):

[1] -Poor Workability

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{res}$$

در این معادله θ، θ_{sat} و θ_{res} بترتیب مقادیر رطوبت خاک، رطوبت اشباع و باقی‌مانده خاک ($cm^3.cm^{-3}$)، h مقدار مکش خاک (cm)، α عکس مکش در نقطه ورود هوا و m و n پارامترهای تجربی معادله ون‌گنوختن هستند.

اگر منحنی رطوبتی براساس مقدار رطوبت خاک (θ) در برابر لگاریتم طبیعی مکش خاک ln(h) رسم شود، منحنی دارای شیب و یک نقطه عطف خواهد بود که شیب آن از معادله زیر به دست می‌آید (معادله ۲):

$$S = \frac{d\theta}{d\ln(h)} = \frac{d\theta}{dh}\frac{dh}{d\ln(h)}$$

شیب منحنی رطوبتی بر اساس معادله ون‌گنوختن به صورت زیر به دست می‌آید (معادله ۳):

$$S = \frac{d\theta}{d\ln(h)} = -mn(\theta_{sat} - \theta_{res})\alpha^n h^n[1 + (\alpha h)^n]^{-m-1}$$

و شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن عبارت است از (معادله ۴):

$$S_i = \frac{d^2\theta}{d\ln h^2} = -mn(\theta_{sat} - \theta_{res})\alpha^n\{nh^{n-1}[1 + (\alpha h)^n]^{-m-1} + h^n(-m-1)\alpha^n nh^{n-1}[1 + (\alpha h)^n]^{-m-2}\}h = 0$$

بنابراین پتانسل آب در نقطه عطف عبارت است از (معادله ۵):

$$h_i = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{1}{m}\right]^{\frac{1}{n}}$$

با جایگزینی مقدار h_i در معادله اول، مقدار رطوبت در نقطه عطف به دست می‌آید (معادله ۶):

$$\theta_i = (\theta_{sat} - \theta_{res})\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-m} + \theta_{res}$$

با جایگزینی معادله ۵ در معادله ۳ شیب در نقطه عطف منحنی رطوبتی به دست می‌آید (معادله ۷):

$$S_i = -n(\theta_{sat} - \theta_{res})\left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)}$$

اگر ثابت معادله معلم (۱۹۷۶) یعنی $m = 1 - \frac{1}{n}$ را در معادله فوق (معادله ۷) قرار دهیم، معادله شیب در نقطه عطف منحنی رطوبتی به صورت زیر در می‌آید (معادله ۸):

$$S_i = -n(\theta_{sat} - \theta_{res})\left[\frac{2n-1}{n-1}\right]^{\left(\frac{1}{n}-2\right)}$$

با برازش معادله ۱ به داده آزمایشگاهی منحنی رطوبتی مقادیر m، n، α و θ_{sat} و θ_{res} تعیین می‌شود و سپس S_i محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج تحقیقات دامنه‌دار دکستر (a۲۰۰۴)، شاخص S_i در ارزیابی تاثیرپذیری خاک از تیمارهای مختلف به ویژه از جنبه خاک‌ورزی و مدیریت آبیاری بسیار سودمند می‌باشد.

۱-۷-۱۰- روش راهنماي نمره‌دهي دانشگاه کورنل

یکی دیگر از روشهای تعیین کیفیت خاک روش راهنمای نمره‌دهی دانشگاه کورنل است. آزمون سلامت خاک کورنل نیز یک برنامه جدید است که در سال ۲۰۰۷ به اجرا درآمده است. هدف اولیه آن تسریع آموزش در مورد سلامت خاک، راهنمایی کشاورزان و مدیران اراضی در انتخاب اقدامات مدیریت خاک، ایجاد امکان پایش برای NRCS، و افزایش ارزش اراضی به طور غیر مستقیم از طریق به دست آوردن اطلاعات در رابطه با شرایط کلی خاک می‌باشد. در ضمن این برنامه از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی استفاده می‌کند. مقادیر اندازه-گیری شده با استفاده از منحنی‌های پاسخ خطی گوناگون تفسیر می‌شوند. این برنامه به اقدامات مدیریت زراعی و خاکی (همانند شخم، تناوب، استفاده از کود دامی و ...) حساس بوده، با چگونگی تعریف کارکردهای بحرانی خاک در ارتباط است. برنامه سلامت خاک کورنل، برای کمک به پایش وضعیت سلامت خاک ۳۹ شاخص فیزیکی، شیمیایی و زیستی پیشنهاد می‌دهد (شکل ۱-۱۶). این شاخص‌های برای اندازه‌گیری وضعیت بهبود یا تخریب و تغییرات طولانی مدت خاک در نتیجه اقدامات مدیریتی مشخص انتخاب شده‌اند (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

در این روش بر اساس اهمیت نسبی هر شاخص نمره‌ای به آن تعلق می‌گیرد. برای تعیین مقادیر کمی کیفیت خاک، پس از تعیین نمره هر شاخص، مجموع نمرات تمامی شاخص‌های مورد بررسی بر تعداد آنها تقسیم می-شود. در این روش امتیازی که به شاخص‌ها داده می شود و همچنین نمره‌ی کیفیت خاک عددی بین صفر تا ۱۰۰ (یا صفر تا یک) است. در نهایت مجموع امتیازها بیانگر کیفیت خاک به صورت بیش از ۸۵ درصد خیلی زیاد، بین ۸۵-۷۰ درصد زیاد، ۷۰-۵۵ درصد متوسط، ۵۵-۴۰ درصد کم، و کمتر از ۴۰ درصد خیلی کم است (امامی و همکاران، ۱۳۹۳).

شکل ۱-۱۶- شاخص‌های پیشنهاد شده توسط برنامه سلامت خاک کورنل برای پایش وضعیت سلامت خاک (بون و همکاران، ۲۰۱۲).

خصوصیات فیزیکی	خصوصیات شیمیایی	خصوصیات زیستی
جرم مخصوص ظاهری	نیتروژن نیتراتی	تشخیص سلامت ریشه
تخلخل منافذ درشت	اسیدیته خاک	مقدار ماده آلی
تخلخل منافذ متوسط	اسیدیته قابل تبادل	جمعیت نماتدهای مفید
تخلخل منافذ ریز	فسفر	جمعیت نماتدهای مضر
ظرفیت آب قابل استفاده	منیزیم	پتانسیل معدنی شدن نیتروژن
مقاومت به نفوذ در فشار ۱۰ کیلوپاسکال	کلسیم	میزان تجزیه
هدایت هیدرولیکی اشباع	آهن	تست کربن فعال
اندازه خاکدانه‌های خشک (کمتر از ۰/۲۵ میلی متر)	آلومینیوم	بذر علف هرز
اندازه خاکدانه‌های خشک (۰/۲۵- ۲ میلی متر)	منگنز	میزان جمعیت میکروبی
اندازه خاکدانه‌های خشک (۸-۲ میلی متر)	روی	
پایداری خاکدانه‌های خیس (۰/۲۵ میلی متر)	مس	
پایداری خاکدانه‌های خیس (۸-۲ میلی متر)		
سخت لایه سطحی		
سخت لایه زیر سطحی		
نفوذپذیری		

Copy protected with Online-PDF-No-Copy.com