



ارزیابی روش‌های نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک برای تعیین کیفیت آن در کاربری‌های مختلف

فاطمه سمیع خشک‌اسطلخی، نفیسه یغمائیان*، سپیده ابریشم‌کش و عطااله مصلحت‌جو

دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ fatemehsamie727@gmail.com

دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ yaghmaeian_na@guilan.ac.ir

استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ sabrishamkesh@guilan.ac.ir

کارشناس ارشد آبخیزداری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان؛ yaghmaeiann_na@guilan.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۲/۱/۱۹ و پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

چکیده

جنگل‌ها نقش مهمی در پایداری زیست‌بوم دارند و جنگل‌تراشی یکی از عوامل کاهش کیفیت خاک به شمار می‌آید. در این پژوهش، با بهره‌گیری از تحلیل‌های چند متغیره، شاخص کیفیت خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و زراعی در منطقه سی‌دشت استان گیلان ارزیابی شد. ۲۰ نمونه خاک مرکب از هر کاربری و از دو عمق ۱۰-۲۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر برداشت شد. شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک با استفاده از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و دو گروه (۱) مجموعه داده حداقل (MDS₁) و (۲) مجموعه داده حداقل تصحیح شده (MDS₂)، محاسبه شد. هم‌چنین، دو روش وزن‌دهی (واریانس و سهم هر ویژگی) و نمره‌دهی (خطی و غیرخطی) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که از نظر شاخص کیفیت خاک، تفاوت بین کاربری‌های اراضی توسط MDS₂ در روش نمره‌دهی غیرخطی بهتر از روش خطی نمایان می‌شود، به طوری که میانگین شاخص کیفیت خاک در کاربری جنگل و مرتع بیشتر از کاربری زراعی بود. شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود. مجموعه داده حداقل تصحیح شده (MDS₂) که شامل ویژگی‌های سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس بود، با دارا بودن راندمان ۸۰٪ در مقایسه با مجموعه داده حداقل (MDS₁) از کارایی بالاتری برخوردار بود. اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک نشان داد که شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) اولین رتبه را داشت و این شاخص تغییر در شیوه‌های مدیریتی و وضعیت کلی خاک را بهتر نشان داده و مناسب‌ترین روش در ارزیابی اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه بود.

کلمات کلیدی: شاخص‌های کیفیت خاک، تغییر کاربری اراضی، مجموعه داده حداقل تصحیح شده، جنگل‌تراشی

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir



مقدمه

کیفیت خاک، ظرفیتی از عملکرد آن در محدوده‌ی زیست‌بوم و کاربری اراضی است؛ به طوری که کیفیت محیط‌زیستی و کیفیت زیستی خاک و همچنین قابلیت تولید آن حفظ و موجب بهبود سلامت گیاهان، جانوران و انسان شود (دوران و پارکین، ۱۹۹۴). به دلیل ماهیت پیچیده مفهوم کیفیت خاک، می‌توان با اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف که نمایان‌گر کارکرد خاک هستند به طور غیرمستقیم، کیفیت خاک را استنباط کرد (رئیس، ۲۰۱۷؛ سیون و همکاران، ۲۰۱۷).

شاخص کیفیت خاک^۱ در سه مرحله (۱) انتخاب ویژگی‌ها، (۲) نمره‌دهی به ویژگی‌های منتخب و (۳) ادغام ویژگی‌ها در یک شاخص نهایی حاصل می‌شود (کارلن و همکاران، ۲۰۰۳). به طور معمول در بررسی کیفیت خاک ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک به دو صورت مجموعه کل داده^۲ و مجموعه داده حداقل^۳ در نظر گرفته می‌شوند و در اکثر موارد به منظور صرفه‌جویی در هزینه و وقت، برخی ویژگی‌های خاک به عنوان مجموعه داده حداقل، برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته می‌شود (زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از محدودیت‌های ارزیابی کیفیت خاک عدم وجود یک روش پذیرفته شده جامع برای توسعه شاخص‌های کیفیت خاک است. در حال حاضر، شاخص‌های جدید بیش از حد توسعه یافته‌اند، که به نظر می‌رسد محلی و غیر قابل توجیه است. بنابراین محققان باید قبل از توسعه شاخص‌های جدید تاکید بیش‌تر بر ارزیابی شاخص‌های موجود داشته باشند (چی و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین فقدان مولفه‌هایی که معرف خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و

بیولوژیکی خاک باشند، حساسیت آن‌ها را به تغییرات کیفیت خاک کاهش خواهد داد و منجر به نتایج غیردقیق می‌شود؛ بنابراین انتخاب مجموعه‌های محدود و قابل تفسیر شاخص‌های کیفیت خاک نیاز به مطالعه بیش‌تر دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۸a).

شیوه‌های مدیریت کشاورزی و تغییر کاربری اراضی از عوامل تاثیرگذار بر کیفیت خاک هستند (مارزائولی و همکاران، ۲۰۱۰). در نتیجه درک روابط بین تغییرات کاربری اراضی و کیفیت خاک ضروری است (داوری و همکاران، ۲۰۲۰). توسعه کشاورزی و رشد جمعیت از جمله مواردی است، که باعث بهره‌برداری بی‌رویه زیست‌بوم‌های کشاورزی و تغییر کاربری اراضی از زیست‌بوم‌های طبیعی مانند جنگل‌ها و مراتع به اراضی کشاورزی می‌شود (رحمانی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴). جنگل‌تراشی مهم‌ترین عامل تخریب خاک است زیرا می‌تواند باعث تشدید مسائل تغییر اقلیم و امنیت آب و غذا شود (رضاپور و علی‌پور، ۲۰۱۷). تقاضای فعلی برای محصولات کشاورزی، تبدیل مداوم جنگل به زمین کشاورزی را گسترش می‌دهد که تأثیر منفی قابل توجهی بر کیفیت خاک دارد (بخشنده و همکاران، ۲۰۱۹). ارزیابی ویژگی‌های خاک سطحی، بسیار معمول و آسان است اما در مقایسه با عمق زیرسطحی خاک، اطلاعات ناقصی از کارکرد خاک را ارائه می‌دهد. ارزیابی ویژگی‌های زیرسطحی کیفیت خاک، جهت شناسایی ویژگی‌های موثر بر کارکرد پایه خاک، کمک خواهد کرد (سانتوس - فرانسیس و همکاران، ۲۰۱۹).

سلمی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص تجمعی ساده کیفیت خاک^۴، شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک^۵ با دو روش وزن‌دهی (واریانس و سهم هر ویژگی) و

1. Soil quality index (SQI)

2. Total data set (TDS)

3. Minimum data set (MDS)

4. Additive soil quality index (SQI_a)

5. Weighted additive soil quality index (SQI_w)

داشته و از آنجایی که اراضی تغییر یافته، نیازمند شیوه‌های مدیریتی خاصی هستند، شناسایی خاک‌های با کیفیت پایین ضرورت دارد (بخشنده و همکاران، ۲۰۱۹؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a). بنابراین مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های چند متغیره و همچنین تعیین مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک، مناسب‌ترین روش انتخاب ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک، روش وزن‌دهی و نمره‌دهی در منطقه سی‌دشت استان گیلان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه، اراضی واقع در روستای سی‌دشت که به فاصله ۲۰ کیلومتری از شهرستان توتکابن و در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه و ۱۵ ثانیه شرقی در جنوب استان گیلان قرار دارد، مورد مطالعه قرار گرفت. متوسط بارندگی سالیانه در منطقه ۹۵۷ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب، زریک و تریک می‌باشد (بنایی، ۱۳۷۷) و دارای مواد مادری آهکی و تیپ اراضی تپه ماهوری و فلات است.

جهت بررسی اثر جنگل‌تراشی، نمونه‌برداری خاک (۲۰ نمونه خاک مرکب از هر کاربری) از کاربری جنگل به عنوان کاربری شاهد با پوشش جنگلی بلوط (*Quercus castaneifolia*) و انجیلی (*Parrotiapersica*)، کاربری زراعی با کشت دیم گندم (با سابقه‌ای حدود ۵۰ سال)، و کاربری مرتع از دو عمق صفر تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری هر سه کاربری انجام شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شده به دو صورت دست‌خورده عبور از الک ۲

شاخص کیفیت نمورو خاک^۱ بر اساس TDS و MDS به ارزیابی کیفیت خاک در مصر پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک مبنی بر روش وزن‌دهی واریانس، از شاخص حساسیت^۲ بالاتری برخوردار بود و در مقایسه با سایر شاخص‌های مورد مطالعه در محاسبه شاخص کیفیت خاک مناسب‌تر است. در پژوهشی ژو و همکاران (۲۰۲۲) کیفیت خاک شمال شرقی چین را بر اساس TDS و MDS حاصل از آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و با استفاده از شاخص‌های SQI_w و SQI_n (وزن‌دهی مبنی بر واریانس) در عمق‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که SQI_w بر اساس MDS در دو عمق ۰-۱۰ و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر در مقایسه با سایر شاخص‌های کیفیت خاک از شاخص حساسیت و نسبت کارایی^۳ (نسبت تعداد همبستگی‌های معنی‌دار بین شاخص کیفیت و ویژگی‌های خاک به تعداد ویژگی‌های خاک) بالاتری برخوردار بود. نتایج پژوهش انجام شده به منظور مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک کاربری مرتع در منطقه نیمه خشک شمال غربی ایران نشان داد که شاخص کیفیت نمورو با استفاده از MDS از میزان شاخص حساسیت و نسبت کارایی بالاتری برخوردار است (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین چن و همکاران (۲۰۱۳) نیز به ارزیابی شاخص کیفیت خاک بر اساس مجموعه داده حداقل با روش‌های مختلف در چین پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که شاخص تجمعی وزنی حاصل از درصد واریانس در مقایسه با شاخص تجمعی وزنی حاصل از سهم هر ویژگی دارای شاخص حساسیت بالاتری بود.

جنگل‌های هیرکانی شمال کشور از منابع مهم و حیاتی ایران است، درحالی‌که بدون توجه به محدودیت‌های محیط‌زیستی، جنگل‌تراشی گسترده‌ای در این منطقه صورت گرفته است. این امر با خود، کاهش کیفیت خاک را به دنبال

3. Efficiency ratio (ER)

1. Nemoro quality index (SQI_n)

2. Sensitivity index (SI)

های اصلی قرار گرفت و در روش دوم مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS₂) مجموعه ویژگی‌های فیزیکی و ویژگی‌های شیمیایی خاک به طور مجزا مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفت (یو و همکاران، ۲۰۱۸a). با توجه به تاکید پژوهش حاضر بر ارتباط بین کیفیت خاک و فرسایش‌پذیری خاک، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بیشتر مورد توجه قرار گرفت. لازم به ذکر است تنفس میکروبی خاک به عنوان یکی از ویژگی‌های زیستی پرکاربرد اندازه‌گیری شد؛ اما مقدار تنفس میکروبی بین کاربری‌های مختلف به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداد. بنابراین به نظر می‌رسد در صورتی که در این مطالعه ویژگی‌های زیستی خاک در نظر گرفته نشود، خللی در نتایج ایجاد نخواهد شد. مطالعات مشابه نیز با تاکید بر کیفیت و فرسایش‌پذیری خاک، تنها از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده کردند (دینیز، ۲۰۲۰؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸b).

در این مطالعه از دو روش نمره‌دهی خطی^۱ و نمره‌دهی غیرخطی^۲ استفاده شد. در روش نمره‌دهی خطی، تابع نمره‌دهی بیش‌تر-بهرتر^۳ برای ویژگی‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه، کربن آلی، فسفر قابل دسترس، تابع نمره‌دهی کم‌تر-بهرتر^۴ برای ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری، کلسیم کربنات معادل، و هم‌چنین دامنه بهینه^۵ برای رس، سیلت و واکنش خاک در نظر گرفته شد (آرمینز و همکاران ۲۰۱۳؛ دینیز، ۲۰۲۰؛ فتحی‌زاد و همکاران، ۲۰۲۰؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۰؛ واسو و همکاران، ۲۰۱۶؛ زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰).

(۱)

$$M(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ (0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + 0.1) & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x > x_2 \end{cases}$$

میلی‌متری و دست‌نخورده آماده شدند و برخی ویژگی‌های خاک از جمله؛ بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و همکاران، ۱۹۸۶)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پارافین (بلیک و هارتج، ۱۹۸۶)، واکنش خاک و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲/۵ خاک به آب به ترتیب با دستگاه pH متر و EC سنج (رودس، ۱۹۸۳)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (والکلی و بلک، ۱۹۳۴)، کلسیم کربنات معادل به روش تیتراسیون (اسپارک و همکاران، ۱۹۹۶)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (اولسن و همکاران، ۱۹۵۴)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (برمنز، ۱۹۶۰)، میانگین وزنی قطر خاکدانه به روش الک تر پس از گذراندن نمونه خاک از الک ۴/۷۶ میلی‌متر از مجموعه الک‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵۳ میلی‌متر به مدت ۱۰ دقیقه با دامنه ۳/۱۸ سانتی‌متر و نوسان ۳۰ دور بر دقیقه (کمپر و روزناو، ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شدند.

محاسبه شاخص کیفیت خاک

با هدف کاهش تعداد متغیرهای مورد مطالعه و تعیین ویژگی‌هایی که بیش‌ترین تاثیر را در کیفیت خاک دارند از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده شد. مولفه‌های اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک مشخص شدند و در هر مولفه اصلی، ویژگی‌های دارای بیش‌ترین وزن تعیین گردید؛ سپس ۱۰ درصد بالاترین وزن ویژگی مورد نظر در هر مولفه، به طوری که دارای ضریب همبستگی پایین ($r < 0.6$) و وزن بالاتر بودند به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ گوارتس و همکاران، ۲۰۰۶).
گزینش ویژگی‌های مجموعه داده حداقل به دو صورت انجام پذیرفت: به طوری که در روش اول مجموعه داده حداقل (MDS₁) تمام ویژگی‌های خاک مورد آنالیز تجزیه به مولفه

4. Less is better

5. Optimal range

1. Linear scoring (LS)

2. Nonlinear scoring (NLS)

3. More is better

"و" کم‌تر-بهرتر" بسته به این که مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده پایین‌تر یا بالاتر از حد بهینه بود، امتیازدهی ویژگی‌ها صورت گرفت. اگر مقدار ویژگی خاک معادل با محدوده بهینه بود، امتیاز آن ویژگی برابر یک در نظر گرفته شد (Armenise et al., 2013).

$$L(x) = \begin{cases} 1 & x < x_1 \\ (1 - 0.9 \times \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}) & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0.1 & x > x_2 \end{cases} \quad (2)$$

پس از انتخاب ویژگی‌های خاک به عنوان MDS و نمره‌دهی آن‌ها جهت محاسبه شاخص کیفیت خاک از شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک استفاده شد (رئسی و کبیری، ۲۰۱۶).

$$SQI_w = \sum_{i=1}^N W_i N_i \quad (5)$$

در رابطه ۵، SQI_w شاخص تجمعی وزنی کیفیت خاک، W_i وزن ویژگی‌های خاک است که به دو صورت نسبت سهم^۵ حاصل از تجزیه عامل^۶ به مجموع سهم‌های مورد نظر (w_1) و درصد واریانس حاصل از مؤلفه‌های اصلی استاندارد (w_2) به دست آمدند (رحمانی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴؛ رئسی، ۲۰۱۷) و N_i نمره ویژگی‌های خاک می‌باشد. وزن در روش دوم (w_2) از درصد واریانس استاندارد حاصل از مؤلفه‌های اصلی (مقدار کل واریانس مؤلفه برای متغیرهای غیرهمبسته و نسبت مقدار کل واریانس مؤلفه به تعداد متغیرها برای متغیرهای همبسته) به دست آمد.

بنابراین شاخص کیفیت خاک برای هر یک از نمونه‌های خاک با استفاده از دو مجموعه داده حداقل (MDS_1) و مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS_2) و با استفاده از توابع نمره‌دهی خطی (LS) و غیرخطی (NLS) و به دو شیوه وزن‌دهی (w_1 و w_2) تعیین شدند. در نتیجه برای هر نمونه خاک، هشت شاخص کیفیت خاک شامل SQI_{w1} ، SQI_{w2} ، $SQI_{w1-MDS1-NLS}$ ، $SQI_{w2-MDS1-LS}$ ، $SQI_{w1-MDS2-LS}$ ، $SQI_{w2-MDS2-LS}$ ، $SQI_{w1-MDS1-NLS}$ و $SQI_{w2-MDS2-NLS}$ به دست آمد (شکل ۱).

$$O(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ 0.9 \times \frac{x - x_1}{r_1 - x_1} + 0.1 & x_1 \leq x < r_1 \\ 1 & r_1 \leq x \leq r_2 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x - r_2}{x_2 - r_2} & r_2 < x \leq x_2 \\ 0.1 & x > x_2 \end{cases} \quad (3)$$

در این روابط $M(x)$ تابع بیشتر-بهرتر، $L(x)$ تابع کمتر-بهرتر، $O(x)$ تابع بهینه، x_1 و x_2 به ترتیب حدود آستانه پایینی^۱ و بالایی^۲، r_1 و r_2 به ترتیب مقادیر پایینی^۳ و بالایی^۴ دامنه بهینه و x مقدار ویژگی خاکی مورد نظر است (کی و همکاران، ۲۰۰۹).

تابع نمره‌دهی غیرخطی با استفاده از رابطه ۴ به دست آمد (عسکری و هولدن، ۲۰۱۵).

$$NLS = \frac{1}{1 + (\frac{x}{x_m})^b} \quad (4)$$

NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، X مقدار ویژگی خاک اندازه‌گیری‌شده، X_m میانگین ویژگی موردنظر در کل منطقه، b شیب معادله که برای معادله بیش‌تر-بهرتر و کم‌تر-بهرتر به ترتیب عدد $۲/۵$ و $-۲/۵$ استفاده می‌شود.

تابع امتیازدهی "محدوده بهینه" برای ویژگی‌هایی که دارای حدود بهینه مناسبی می‌باشند، مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب که یک محدوده بهینه برای آن ویژگی خاک تعریف شد و سپس با استفاده از توابع "بیش‌تر-بهرتر

4. Upper value of optimal range

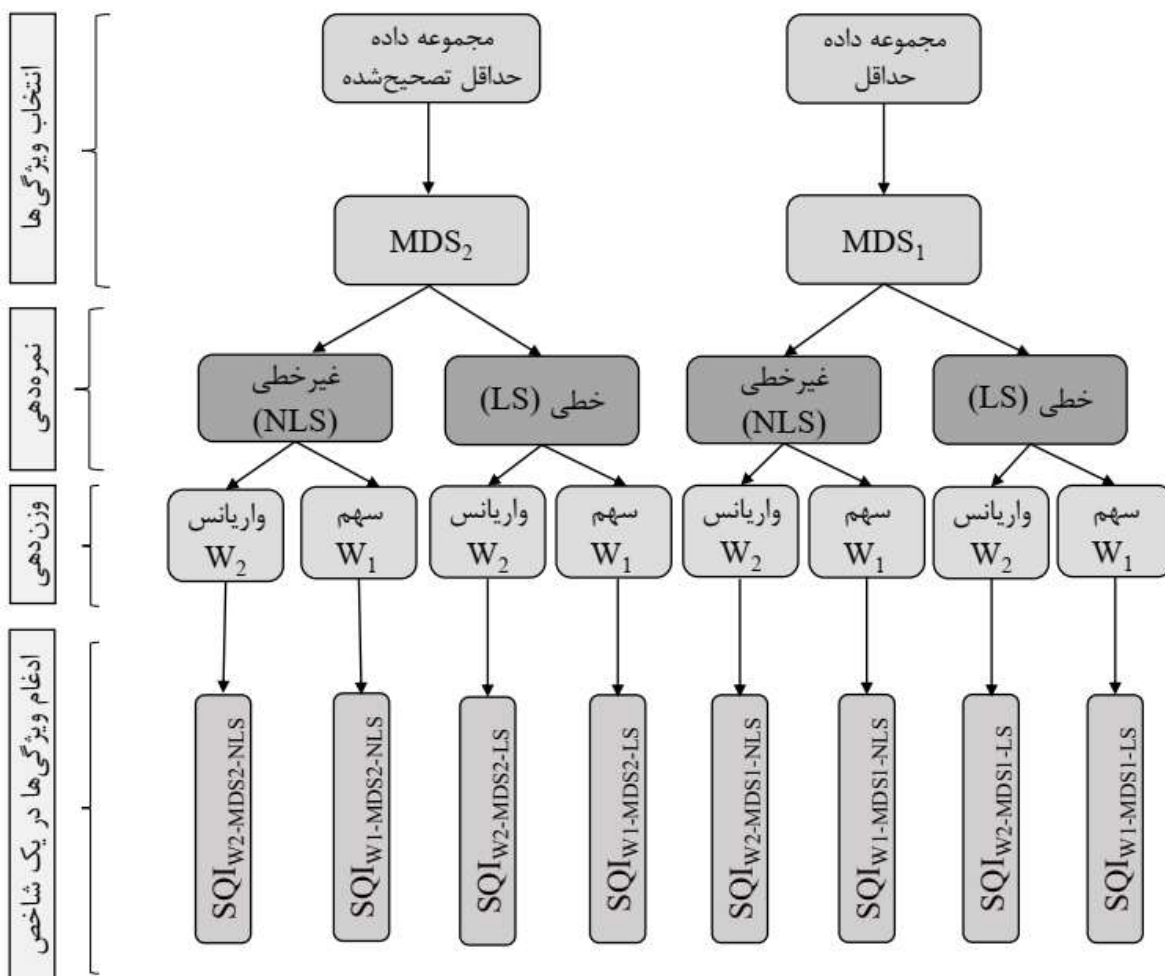
5. Communalities

6. Factor analysis

1. Lower threshold

2. Upper threshold

3. Lower value of optimal range



شکل ۱- مراحل انجام محاسبات شاخص کیفیت خاک

شاخص حساسیت و نسبت کارآیی

جهت ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک، از شاخص حساسیت و نسبت کارآیی استفاده شد (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹):

$$SI = \frac{SQI_{max}}{SQI_{min}} \quad (6)$$

در رابطه ۶، SI شاخص حساسیت، SQI_{max} ، SQI_{min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل شاخص کیفیت خاک در هر روش محاسباتی است، میزان شاخص حساسیت بالاتر نمایانگر مناسب بودن و حساسیت بیشتر شاخص مدنظر نسبت به تغییرات مدیریتی است.

$$ER = \left(\frac{K}{N}\right) \times 100 \quad (7)$$

در این رابطه، ER نسبت کارآیی، K تعداد همبستگی معنی‌دار بین شاخص کیفیت و ویژگی‌های خاک در هر روش محاسباتی، N تعداد ویژگی‌های خاک است که ۶ ویژگی در MDS_1 و ۵ ویژگی در MDS_2 به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند، بالاتر بودن نسبت کارآیی نشان می‌دهد که کدام یک از شاخص‌های محاسباتی کیفیت برای شرایط کلی خاک کارآیی بهتری دارد. سرانجام، مقادیر شاخص حساسیت و نسبت کارآیی رتبه‌بندی شدند به

نتایج

توصیف آماری ویژگی‌های مورد بررسی در سه کاربری جنگل، مرتع و زراعی در جدول ۱ ارائه شده است، با توجه به میانگین ذرات معدنی خاک، سه کاربری مورد نظر در کلاس بافت رسی قرار گرفتند. با توجه به میانگین ذرات معدنی خاک، اجزای رس، سیلت و شن در سه کاربری مورد نظر به ترتیب ۵۱/۴۹، ۲۸/۲۸ و ۲۰/۲۳ درصد بود که در کلاس بافت رسی قرار گرفتند. میانگین وزنی قطر خاکدانه در کاربری جنگل (۲/۵۵ میلی‌متر) در مقایسه با مرتع (۲/۱۵ میلی‌متر) و زراعی (۱/۷۹ میلی‌متر) بالاتر بود. کاربری زراعی به طور میانگین دارای بالاترین میزان کلسیم کربنات معادل (۱۱/۹۲ درصد) بود. هم‌چنین میانگین کربن آلی در کاربری زراعی (۱/۸۶ درصد) در مقایسه با جنگل و مرتع (۲/۰۴ و ۱/۹۰ درصد) کم‌تر بود. در کاربری جنگل و زراعی بیشترین ضریب تغییرات برای فسفر قابل دسترس و در کاربری مرتع برای قابلیت هدایت الکتریکی به دست آمد. کمترین ضریب تغییرات در هر سه کاربری مربوط به جرم مخصوص ظاهری بود.

طوری‌که بالاترین میزان رتبه یک و مقادیر پایین‌تر دارای رتبه بالاتری بودند و جهت تصمیم‌گیری و اولویت‌دهی^۱ شاخص کیفیت خاک مناسب، مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی هر شاخص کیفیت خاک محاسباتی در نظر گرفته شد (شیدای کرکچ و همکاران، ۲۰۱۹). نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور کاربری (در سه سطح) و عمق خاک (در دو سطح) در نرم افزار SAS نسخه ۹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. نمودارها توسط EXCEL رسم گردید.

^۱. Priority

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک

کاربری زراعی			کاربری مرتع				کاربری جنگل			ویژگی خاک		
ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	دامنه تغییرات	میانگین	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	دامنه تغییرات	میانگین	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار		دامنه تغییرات	میانگین
۹/۸۲	۴/۹۷	۵۹/۶۰-۴۱/۰۰	۵۰/۴۷	۱۳/۴۸	۷/۱۰	۶۶/۵۰-۴۰/۲۱	۵۲/۷۷	۱۲/۱۸	۶/۳۷	۶۳/۵۶-۴۰/۵۲	۵۱/۲۲	رس (%)
۹/۳۷	۲/۶۹	۳۴/۰۰-۲۴/۰۱	۲۸/۸۳	۱۴/۹۸	۴/۱۴	۳۵/۹۰-۲۰/۷۰	۲۷/۷۰	۱۲/۲۷	۳/۴۹	۳۴/۶۵-۲۱/۵۸	۲۸/۳۱	سیلت (%)
۱۲/۷۰	۲/۶۳	۲۵/۰۴-۱۶/۳۹	۲۰/۷۰	۱۶/۹۷	۳/۲۹	۲۵/۳۸-۱۲/۸۰	۱۹/۵۳	۱۴/۰۶	۲/۹۹	۲۵/۹۱-۱۴/۸۶	۲۰/۴۷	شن (%)
۷/۱۱	-/۱۱	۱/۶۹-۱/۳۷	۱/۵۶	۶/۷۳	-/۱۰	۱/۶۹-۱/۳۹	۱/۵۶	۵/۶۷	-/۰۹۲	۱/۶۹-۱/۲۹	۱/۶۳	جرم مخصوص ظاهری (g.cm ⁻³)
۲۱/۸۶	-/۳۸	۲/۵۴-۱/۰۷	۱/۷۹	۲۰/۰۵	-/۴۲	۲/۹۰-۱/۲۳	۲/۱۵	۱۵/۶۶	-/۴۳	۳/۰۲-۱/۶۲	۲/۵۵	میانگین وزنی قطر خاکدانه (mm)
۹/۴۳	-/۶۲	۷/۹۸-۵/۶۲	۶/۷۴	۹/۱۶	-/۶۳	۸/۳۲-۶/۱۶	۷/۰۶	۸/۰۱	-/۵۰	۷/۳۶-۵/۳۶	۶/۴۱	واکنش خاک
۳۰/۹۱	-/۰۲۸	-/۱۴-۰/۰۵	-/۰۹	۶۲/۷۰	-/۰۴۵	-/۱۹-۰/۰۳	-/۰۷	۳۹/۹۸	-/۰۲۳	-/۱۱-۰/۰۲	-/۰۶	قابلیت هدایت الکتریکی (dS.m ⁻¹)
۲۷/۰۷	-/۵۸	۲/۸۵-۰/۴۱	۱/۸۶	۲۱/۰۹	-/۶۲	۲/۹۶-۰/۹۶	۱/۹۰	۱۸/۱۹	-/۶۶	۲/۸۹-۰/۴۹	۲/۰۴	کربن آلی (%)
۴۳/۱۲	۵/۱۷	۱۸/۷۰-۱/۰۰	۱۱/۹۲	۵۶/۳۲	۵/۱۲	۱۶/۲۵-۰/۲۵	۹/۰۵	۶۱/۱۰	۴/۷۳	۱۴/۷۵-۱/۰۰	۷/۸۱	کلسیم کربنات معادل (%)
۶۱/۴۱	۳/۸۵	۱۳/۶۹-۰/۰۲	۵/۰۵	۴۴/۰۲	۲/۱۶	۸/۴۷-۱/۹۴	۴/۷۲	۸۸/۲۴	۳/۳۴	۱۰/۱۱-۰/۰۲	۳/۷۵	فسفر قابل دسترس (mg. kg ⁻¹)
۶۱/۲۷	-/۰۷۷	-/۲۴-۰/۰۰	-/۱۳	۲۷/۳۶	-/۰۷۳	-/۳۱-۰/۰۷	-/۱۷	۵۴/۵۸	-/۰۹۷	-/۲۸-۰/۰۰	-/۱۷	نیترژن کل (%)

مجموعه داده حداقل

در MDS₁ با استفاده از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی، چهار مولفه اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک با درصد واریانس جمعی ۷۱/۶۸ استخراج شد، ویژگی‌های با بیش‌ترین سهم یا بزرگ‌ترین مقادیر بردار ویژه در مولفه اول با درصد واریانس ۲۴/۰۳ شامل درصد رس و سیلت همبستگی معنی‌داری ($r = -0/965$) با یکدیگر داشتند (جدول ۳) و درصد رس با دارا بودن وزن بیش‌تر در مجموعه داده حداقل قرار گرفت. در مولفه دوم با واریانس ۲۱/۲۶ درصد، درصد سیلت دارای بالاترین وزن بود و رس، جرم مخصوص

ظاهری و کربن آلی شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بودند و با توجه به همبستگی پایین بین سیلت با جرم مخصوص ظاهری ($r = -0/427$) و کربن آلی ($r = -0/360$)، (جدول ۳) سه ویژگی سیلت، جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی انتخاب شدند، در مولفه سوم (درصد واریانس ۱۵/۹۹) و چهارم (درصد واریانس ۱۰/۴۱) به ترتیب، فسفر قابل دسترس و واکنش خاک با دارا بودن بالاترین وزن به عنوان MDS انتخاب شدند: بنابراین، درصد رس، درصد سیلت، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، فسفر قابل دسترس و واکنش خاک به عنوان MDS₁ انتخاب شدند (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی و وزن ویژگی‌های مجموعه داده حداقل بر اساس سهم و واریانس

مجموعه داده حداقل				MDS ₁				
وزن (W ₂)	واریانس	وزن (W ₁)	سهم	مولفه ۴ PC 4	مولفه ۳ PC 3	مولفه ۲ PC 2	مولفه ۱ PC 1	
				۱/۰۴۱	۱/۵۹۹	۲/۱۲۶	۲/۴۰۳	ارزش ویژه
				۱۰/۴۱۰	۱۵/۹۸۶	۲۱/۲۵۸	۲۴/۰۲۷	درصد واریانس
				۷۱/۶۸۱	۶۱/۲۷۱	۴۵/۲۸۵	۲۴/۰۲۷	درصد واریانس جمعی
								بردارهای ویژه
-۰/۳۳۵	-۰/۲۴۰	-۰/۲۰۱	-۰/۹۳۸	-۰/۰۰۸	-۰/۱۷۱	-۰/۶۱۰	-۰/۷۳۲	رس
-۰/۰۹۹	-۰/۰۷۱	-۰/۱۹۹	-۰/۹۳۰	-۰/۰۱۳	-۰/۲۱۸	-۰/۶۲۶	-۰/۷۰۰	سیلت
-۰/۰۹۹	-۰/۰۷۱	-۰/۱۱۸	-۰/۵۵۰	-۰/۱۱۳	-۰/۳۹۷	-۰/۶۰۹	-۰/۰۸۸	جرم مخصوص ظاهری خاک
				-۰/۴۲۸	-۰/۰۰۹	-۰/۴۱۶	-۰/۴۸۰	میانگین وزنی قطر خاکدانه
-۰/۱۴۵	-۰/۱۰۴	-۰/۱۷۵	-۰/۸۱۵	-۰/۶۱۰	-۰/۰۸۴	-۰/۲۷۰	-۰/۶۰۲	واکنش خاک
				-۰/۲۸۹	-۰/۳۳۹	-۰/۳۳۹	-۰/۶۳۵	قابلیت هدایت الکتریکی
-۰/۰۹۹	-۰/۰۷۱	-۰/۱۵۱	-۰/۷۰۲	-۰/۰۴۴	-۰/۵۸۳	-۰/۵۹۲	-۰/۱۰۰	کربن آلی
				-۰/۴۵۷	-۰/۱۱۶	-۰/۲۷۷	-۰/۵۶۶	کلسیم کربنات معادل
-۰/۲۲۳	-۰/۱۶۰	-۰/۱۵۶	-۰/۷۲۶	-۰/۴۰۶	-۰/۷۲۳	-۰/۰۳۳	-۰/۱۹۳	فسفر قابل دسترس
				-۰/۱۱۸	-۰/۶۰۴	-۰/۴۴۹	-۰/۰۷۱	نیترژن کل

اعداد پررنگ به‌عنوان بیش‌ترین وزن در نظر گرفته شدند. اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به‌عنوان MDS₁ انتخاب شدند.

جدول ۳- همبستگی پیرسون ویژگی‌های خاک برای مولفه‌های با بیش‌ترین وزن

کلسیم کربنات معادل	کربن آلی	واکنش خاک	جرم		رس
			مخصوص ظاهری خاک	سیلت	
				۱	رس
				۱	سیلت
			۱	-۰/۴۲۷**	جرم مخصوص ظاهری خاک
		۱	۰/۱۰۲	۰/۱۸۶	واکنش خاک
	۱	-۰/۲۰۲	-۰/۸۹۲**	-۰/۳۶۰*	کربن آلی
۱	-۰/۱۸۶	۰/۱۵۵	۰/۱۶۳	۰/۱۷۸	کلسیم کربنات معادل

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد.

وزن و کلسیم کربنات معادل شامل ۱۰ درصد بالاترین وزن بود و با توجه به همبستگی پایین بین آنها ($r = ۰/۱۵۵$)، (جدول ۳) هر دو ویژگی به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند و در مولفه دوم فسفر قابل دسترس به عنوان MDS انتخاب شد. به این ترتیب در روش دوم سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس به عنوان MDS₂ انتخاب شدند (جدول ۴). جهت دستیابی به وزن ویژگی‌های خاک در هر دو روش انتخاب مجموعه داده حداقل به دو صورت سهم هر ویژگی حاصل از آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی و دیگری درصد واریانس استاندارد انجام شد (جدول ۲ و ۴).

در MDS₂ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به طور مجزا مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفتند، به طوری که ویژگی‌های فیزیکی خاک به دو مولفه اصلی با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک، مولفه اول و دوم به ترتیب با واریانس ۵۲/۳۸ و ۳۰/۳۱ درصد و در مجموع ۸۲/۶۹ درصد واریانس تجزیه شدند. در مولفه اول، سیلت و رس ویژگی‌های دارای بالاترین وزن بودند که به دلیل همبستگی بالا ($r = -۰/۹۶۵$)، (جدول ۳) سیلت به عنوان MDS انتخاب شد. در مولفه دوم، میانگین وزنی قطر خاکدانه دارای بالاترین وزن بود. در آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی ویژگی‌های شیمیایی خاک دو مولفه با درصد واریانس ۳۱/۰۸، ۲۶/۸۲ و با واریانس تجمعی ۵۷/۹۰ درصد حاصل شد. در مولفه اول، واکنش خاک دارای بالاترین

جدول ۴- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی و وزن ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده بر اساس سهم و واریانس

مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده			شیمیایی		فیزیکی			
MDS ₂								
وزن (W ₂)	واریانس	وزن (W ₁)	سهم	مولفه ۲ PC 2	مولفه ۱ PC 1	مولفه ۲ PC 2	مولفه ۱ PC 1	
				۱/۶۰۹	۱/۸۶۵	۱/۲۱۳	۲/۰۹۵	ارزش ویژه
				۲۶/۸۲۰	۳۱/۰۸۰	۳۰/۳۱۴	۵۲/۳۸۰	درصد واریانس
				۵۷/۹۰۰	۳۱/۰۸۰	۸۲/۶۹۴	۵۲/۳۸۰	درصد واریانس تجمعی
								بردارهای ویژه
						-۰/۱۳۹	-۰/۹۷۰	رس
۰/۳۰۶	-۰/۵۲۴	-۰/۳۰۱	۰/۹۵۸			-۰/۱۱۰	۰/۹۷۳	سیلت
						۰/۶۶۷	۰/۴۵۰	جرم مخصوص ظاهری خاک
۰/۱۷۶	-۰/۳۰۳	-۰/۲۳۴	۰/۷۴۵			۰/۸۶۰	-۰/۰۷۹	میانگین وزنی قطر خاکدانه
۰/۱۸۱	-۰/۳۱۱	-۰/۱۷۵	۰/۵۵۷	-۰/۲۸۱	۰/۶۹۲			واکنش خاک
				۰/۵۱۹	۰/۶۲۱			قابلیت هدایت الکتریکی
				۰/۵۸۵	-۰/۵۵۸			کربن آلی
۰/۱۸۱	-۰/۳۱۱	-۰/۱۲۹	۰/۴۱۱	-۰/۱۰۳	۰/۶۳۳			کلسیم کربنات معادل
۰/۱۵۶	-۰/۲۶۸	-۰/۱۶۱	۰/۵۱۰	۰/۷۱۴	-۰/۰۰۸			فسفر قابل دسترس
				۰/۶۳۱	-۰/۴۵۰			نیتروژن کل

ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های شیمیایی

اعداد پررنگ به‌عنوان بیش‌ترین وزن در نظر گرفته شدند. اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

شاخص کیفیت خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد (به دلیل محدودیت حجم مقاله، جدول ارائه نشده است) که در MDS₁، اثر عمق خاک بر SQI_{w1}-MDS1-LS و SQI_{w1}-MDS1-NLS در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود و عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در مقایسه با عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود (جدول ۵). اثر عمق خاک در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل کاربری و عمق بر SQI_{w2}-MDS1-LS و SQI_{w2}-MDS1-NLS به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود به طوری که کاربری زراعی در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر و ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب از بیش‌ترین و

کم‌ترین شاخص کیفیت خاک برخوردار بود (جدول ۵). در MDS₂ اثر کاربری اراضی و اثر عمق خاک بر SQI_{w1}-MDS2-LS و SQI_{w2}-MDS2-LS معنی‌دار نبود. با این حال کاربری جنگل در مقایسه با مرتع و زراعی از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود و میزان آن با افزایش عمق کاهش یافت. اثر کاربری اراضی بر SQI_{w1}-MDS2-NLS و SQI_{w2}-MDS2-NLS در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود و خاک کاربری جنگل و مرتع در مقایسه با زراعی از میانگین شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود (جدول ۵). تفاوت بین کاربری‌های اراضی از نظر شاخص کیفیت خاک در روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش نمره‌دهی خطی بهتر مشاهده شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در کاربری و عمق‌های مختلف

کاربری زراعی		کاربری مرتع		کاربری جنگل		شاخص کیفیت خاک			
۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm	۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm	۱۰-۲۰cm	۰-۱۰cm				
۰/۵۳ ^{Ab}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۵۴ ^{Ab}	۰/۵۶ ^{Aa}	۰/۴۸ ^{Ab}	۰/۶۰ ^{Aa}	SQI _{W1-MDS1-LS}	LS	MDS ₁	
۰/۵۴ ^c	۰/۶۸ ^a	۰/۵۶ ^{bc}	۰/۵۷ ^{bc}	۰/۵۵ ^c	۰/۶۲ ^{ab}	SQI _{W2-MDS1-LS}			
۰/۴۴ ^{Ab}	۰/۵۳ ^{Aa}	۰/۴۸ ^{Ab}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۴۴ ^{Ab}	۰/۵۱ ^{Aa}	SQI _{W1-MDS1-NLS}	NLS		
۰/۴۲ ^b	۰/۵۴ ^a	۰/۴۸ ^{ab}	۰/۵۱ ^a	۰/۴۳ ^b	۰/۴۹ ^{ab}	SQI _{W2-MDS1-NLS}			
۰/۶۰ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۴ ^{Aa}	۰/۶۱ ^{Aa}	۰/۶۵ ^{Aa}	SQI _{W1-MDS2-LS}	LS		MDS ₂
۰/۶۰ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۲ ^{Aa}	۰/۶۳ ^{Aa}	۰/۶۱ ^{Aa}	۰/۶۵ ^{Aa}	SQI _{W2-MDS2-LS}			
۰/۴۱ ^{Ba}	۰/۴۹ ^{Ba}	۰/۴۹ ^{Aa}	۰/۵۲ ^{Aa}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۵۳ ^{Aa}	SQI _{W1-MDS2-NLS}	NLS		
۰/۴۲ ^{Ba}	۰/۵۰ ^{Ba}	۰/۵۰ ^{Aa}	۰/۵۲ ^{Aa}	۰/۵۱ ^{Aa}	۰/۵۳ ^{Aa}	SQI _{W2-MDS2-NLS}			

دامنه تغییرات و شاخص حساسیت برای شاخص‌های مختلف کیفیت خاک در (جدول ۶) بیان شد. در مطالعه حاضر، اغلب شاخص‌های کیفیت خاک در MDS₂ در مقایسه با MDS₁ و همچنین روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش نمره‌دهی خطی از شاخص حساسیت بالاتری برخوردار بودند. شاخص حساسیت SQI_{W1-MDS2-NLS} و SQI_{W2-MDS2-} NLS به ترتیب ۲/۳۵ و ۳/۱۴ بود (جدول ۶).

MDS₁ مجموعه داده حداقل، MDS₂ مجموعه داده حداقل تصحیح شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W₁ روش وزن‌دهی سهم و W₂ روش وزن‌دهی واریانس (حروف بزرگ مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین کاربری‌های مختلف در هر عمق خاک می‌باشد. حروف کوچک مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بین اعماق مختلف در هر کاربری می‌باشد).

جدول ۶- توصیف آماری و شاخص حساسیت برای شاخص‌های کیفیت خاک

MDS ₂				MDS ₁				
SQI _{W2-MDS2-NLS}	SQI _{W1-MDS2-NLS}	SQI _{W2-MDS2-LS}	SQI _{W1-MDS2-LS}	SQI _{W2-MDS1-NLS}	SQI _{W1-MDS1-NLS}	SQI _{W2-MDS1-LS}	SQI _{W1-MDS1-LS}	
۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۳۳	حداقل
۰/۸۸	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۹	حداکثر
۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۵۰	میانگین
۳/۱۴	۲/۳۵	۱/۸۶	۱/۹۰	۲/۱۳	۱/۹۱	۱/۸۲	۲/۰۹	شاخص حساسیت
۱	۲	۷	۶	۳	۵	۸	۴	رتبه‌بندی

همبستگی معنی‌داری با شاخص کیفیت خاک مورد نظر بودند بر مجموع تعداد کل ویژگی‌های MDS تقسیم شد. در این مطالعه، MDS₂ که شامل ویژگی‌هایی چون سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس است در مقایسه با MDS₁ با دارا بودن راندمان ۸۰ درصد از کارایی بالاتری برخوردار بود (جدول ۷).

MDS₁ مجموعه داده حداقل، MDS₂ مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W₁ روش وزن‌دهی سهم و W₂ روش وزن‌دهی واریانس جهت دستیابی به نتایج نسبت کارایی، همبستگی بین شاخص کیفیت خاک با ویژگی‌های مورد نظر در MDS₁ (۶ ویژگی) و MDS₂ (۵ ویژگی) در نظر گرفته شد؛ برای هر یک از شاخص‌های کیفیت خاک، تعداد ویژگی‌هایی که دارای

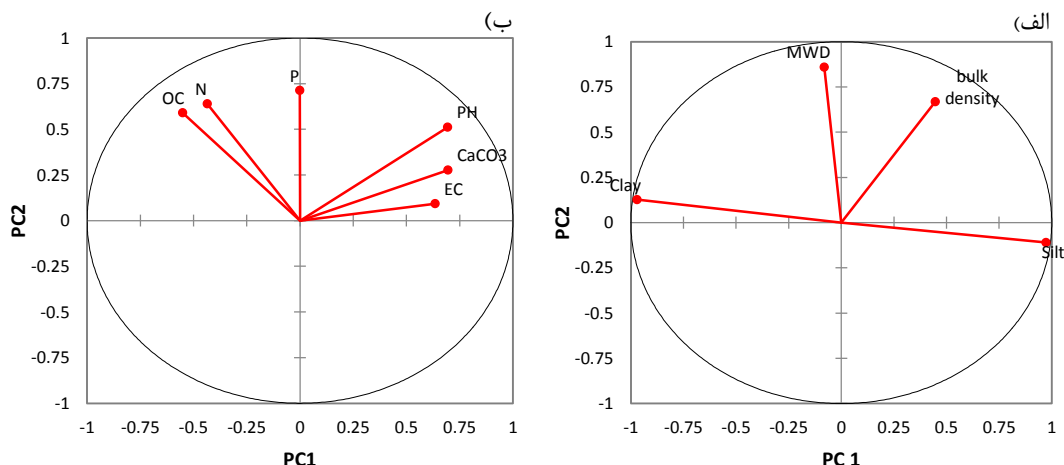
جدول ۷- نسبت کارایی و همبستگی پیرسون شاخص‌های کیفیت خاک و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

MDS ₂				MDS ₁				
SQ _{W2-MDS2-NLS}	SQ _{W1-MDS2-NLS}	SQ _{W2-MDS2-LS}	SQ _{W1-MDS2-LS}	SQ _{W2-MDS1-NLS}	SQ _{W1-MDS1-NLS}	SQ _{W2-MDS1-LS}	SQ _{W1-MDS1-LS}	
-	-	-	-	۰/۰۵۲	۰/۳۲۵*	۰/۰۵۹	۰/۲۲۵	رس
۰/۴۵۵**	-۰/۴۵۸**	-۰/۶۵۹**	-۰/۶۴۵**	-۰/۰۷۹	-۰/۳۶۲**	-۰/۰۶۸	-۰/۲۳۱	سیلت
-	-	-	-	-۰/۲۷۰*	-۰/۱۹۵	-۰/۱۶۱	-۰/۱۸۶	جرم مخصوص ظاهری خاک
۰/۴۲۱**	۰/۵۰۹**	۰/۴۰۰**	۰/۴۳۹**	-	-	-	-	میانگین وزنی قطر خاکدانه
-۰/۱۵۷	-۰/۱۶۳	-۰/۲۲۸	-۰/۲۱۱	۰/۲۱۳	-۰/۱۵۵	-۰/۱۴۶	-۰/۱۹۶	واکنش خاک
-	-	-	-	۰/۱۴۱	۰/۵۸۸**	۰/۶۲۷**	۰/۶۶۸**	کربن آلی
-۰/۶۷۴**	-۰/۵۶۷**	-۰/۴۹۸**	-۰/۴۳۶**	-	-	-	-	کلسیم کربنات معادل
۰/۴۳۹**	۰/۴۹۵**	۰/۳۳۱**	۰/۳۴۵**	۰/۳۳۳**	۰/۷۹۵**	۰/۶۸۸**	۰/۶۰۰**	فسفر قابل دسترس
۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	۳۳	۶۶	۳۳	۳۳	نسبت کارایی
۱	۱	۱	۱	۳	۲	۳	۳	رتبه‌بندی

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد می‌باشد.

اساس، در توزیع وزن ویژگی‌های فیزیکی در مولفه اول (محور افقی) سیلت و در مولفه دوم (محور عمودی) میانگین وزنی قطر خاکدانه و در ویژگی‌های شیمیایی، واکنش خاک و کلسیم کربنات معادل (مولفه اول) و فسفر قابل دسترس (مولفه دوم) بیش‌ترین فاصله از محور مختصات و از بیش‌ترین وزن برخوردار بودند و به عنوان MDS انتخاب شدند.

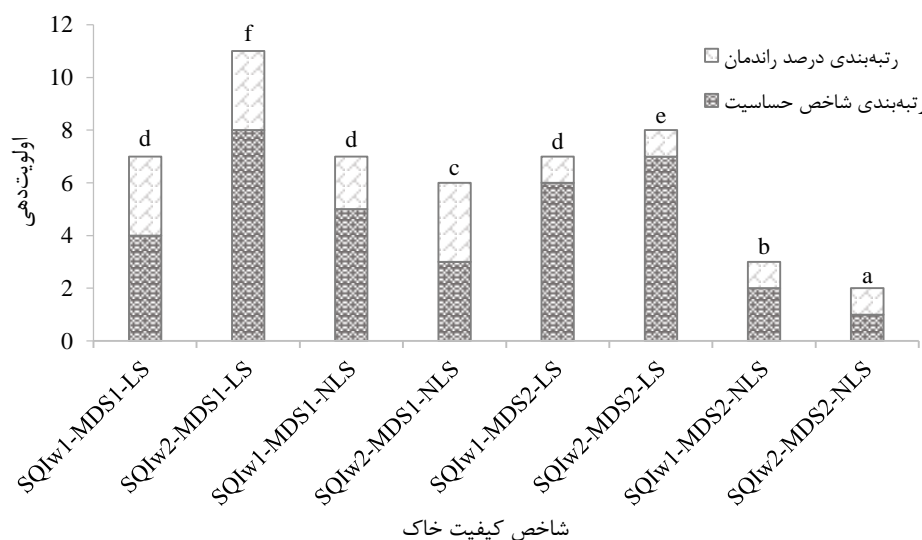
با توجه به برتری MDS₂ در مقایسه با MDS₁ رابطه بین ویژگی‌های خاک و مولفه‌ها در (شکل ۲) نشان داده شده است، در نتایج آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی MDS₂ (جدول ۴) هر یک از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دارای دو مولفه بودند. در هر مولفه، ویژگی‌هایی با وزن بیش‌تر، در فاصله دورتری از مرکز محور مختصات (نقطه صفر) قرار گرفتند و به عنوان ویژگی‌های مهم محسوب شدند. بر این



شکل ۲- توزیع وزن ویژگی‌های خاک در مولفه‌ها. الف) توزیع وزن ویژگی‌های فیزیکی، ب) توزیع وزن ویژگی‌های شیمیایی

گرفت. همچنین از نظر نسبت کارایی، شاخص‌های کیفیت خاک در MDS_2 همگی دارای رتبه یک بودند. به این ترتیب براساس اولویت‌دهی شاخص‌های کیفیت خاک، SQI_{W2} براساس MDS_2-NLS اولین رتبه و $SQI_{W2-MDS1-LS}$ پایین‌ترین رتبه را داشت (شکل ۳).

رتبه‌بندی مقادیر دو معیار شاخص حساسیت و نسبت کارایی به ترتیب در جداول ۶ و ۷ نشان داده شد. از نظر شاخص حساسیت، $SQI_{W2-MDS2-NLS}$ دارای رتبه ۱ و $SQI_{W1-MDS2-NLS}$ دارای رتبه ۲ بوده و $SQI_{W2-MDS1-LS}$ با پایین‌ترین میزان شاخص حساسیت (۱/۸۲) در رتبه ۸ قرار



شاخص کیفیت خاک

شکل ۳- اولویت‌دهی شاخص‌های مختلف کیفیت خاک. (a) اولین، b دومین، c سومین، d چهارمین، e پنجمین، f ششمین)

MDS_1 مجموعه داده حداقل، MDS_2 مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده، LS تابع نمره‌دهی خطی، NLS تابع نمره‌دهی غیرخطی، W_1 روش وزن‌دهی سهم و W_2 روش وزن‌دهی واریانس

بحث

بر اساس طبقه‌بندی والینگ و وب (۱۹۸۰) ویژگی‌های با ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد، ۱۵ تا ۳۵ درصد و بیش‌تر از ۳۵ درصد به ترتیب نشان‌دهنده تغییرپذیری پایین، متوسط و بالا است. با توجه به نتایج جدول ۱ فسفر قابل دسترس، قابلیت هدایت الکتریکی، نیتروژن کل و کلسیم کربنات معادل در مقایسه با سایر ویژگی‌ها از بالاترین تغییرپذیری برخوردار بودند که بالاتر بودن میزان ویژگی‌های مورد نظر در مطالعات رضایی و همکاران (۲۰۲۰) و زراعت‌پیشه و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده شد. به نظر می‌رسد تغییرپذیری بالای ویژگی‌های مورد نظر به دلیل شیوه‌های مدیریتی خاک و شرایط منطقه مطالعاتی باشد.

انتخاب MWD و کلسیم کربنات معادل به عنوان ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده در MDS₂ و استفاده از توابع نمره‌دهی بیش‌تر-بهرتر و کم‌تر-بهرتر (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۷) به ترتیب برای میانگین وزنی قطر خاکدانه و کلسیم کربنات معادل می‌تواند مقادیر بالاتر کیفیت خاک در کاربری جنگل در مقایسه با مرتع و زراعی را توجیه کند، زیرا میانگین وزنی قطر خاکدانه در کاربری جنگل بالاتر از زراعی بود و کاربری زراعی دارای میزان کلسیم کربنات معادل بالاتری بود که دلیل آن می‌تواند عمق کم خاک (کم‌تر از ۰/۵ متر) و مواد مادری آهکی در منطقه مورد مطالعه باشد (جدول ۱). خاک‌های جنگلی و زراعی به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه در هر دو عمق مورد بررسی بودند. ماده آلی خاک نقش مهمی در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها دارد (لیو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۷). از پیامدهای خاکورزی و عملیات زراعی می‌توان به شکسته شدن خاکدانه‌ها و افزایش سرعت تجزیه ماده آلی خاک اشاره کرد (دوو و همکاران، ۲۰۲۰؛ توفان و همکاران، ۲۰۱۹). کاربری جنگل کم‌ترین مقدار کلسیم کربنات معادل در هر دو عمق سطحی و زیرسطحی را دارا بود و نسبت به کاربری زراعی اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ که مقادیر کم‌تر

کلسیم کربنات معادل در خاک‌های جنگلی می‌تواند به علت آبشویی و انتقال کربنات‌ها به لایه‌های پایین‌تر خاک باشد (ایوبی و موذنی دهاقانی، ۲۰۲۰؛ داوری و همکاران، ۲۰۲۰). هم‌چنین بالاتر بودن میزان کیفیت خاک در عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر در مقایسه با عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر می‌تواند به دلیل کاهش کربن آلی خاک و در نتیجه پایداری خاکدانه با افزایش عمق خاک باشد. با افزایش عمق خاک میزان ماده آلی خاک کاهش معنی‌داری در هر سه کاربری نشان داد، وجود بقایای گیاهی و ریشه‌های گسترده در لایه سطحی در کاربری جنگل و مرتع افزایش ماده آلی خاک را به دنبال دارد که این امر می‌تواند موجب بهبود خاکدانه‌سازی نیز شود (ظاهر و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۱۹).

کاربری جنگل کم‌ترین مقدار کلسیم کربنات معادل در هر دو عمق سطحی و زیرسطحی را دارا بود و نسبت به کاربری زراعی اختلاف معنی‌داری نشان داد؛ که می‌تواند به علت آبشویی و انتقال کربنات‌ها به لایه‌های پایین‌تر خاک باشد (ایوبی و موذنی دهاقانی، ۲۰۲۰؛ داوری و همکاران، ۲۰۲۰).

تغییرات نامناسب کاربری اراضی می‌تواند باعث کاهش کیفیت خاک شود (دوان و همکاران، ۲۰۲۱) که چالش بزرگی برای افزایش تولید محصول، رشد اقتصادی و محیط زیست به شمار می‌آید (تسفهونگن، ۲۰۱۴). با توجه به اقلیم مرطوب در منطقه مورد بررسی، ورود سالانه بقایای گیاهی تازه به خاک زیاد بوده و منجر به تجمع زیاد کربن در ذرات درشت خاک می‌شود. با توجه به حساسیت زیاد این بخش از کربن به تغییر کاربری اراضی، جنگل‌تراشی باعث کاهش توانایی ذخیره کربن و هم‌چنین افت شاخص کیفیت خاک می‌شود (تقی‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). بالاتر بودن میزان کیفیت خاک در کاربری جنگل و مرتع در مقایسه با کاربری زراعی با نتایج سایر مطالعات مطابقت دارد به طوری که چندل و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی کیفیت خاک در پنج کاربری اراضی در هند به این نتیجه رسیدند که کاربری جنگل در

مقایسه با سایر کاربری‌ها از میزان کربن آلی بالاتری برخوردار بود و ویژگی‌هایی مانند کربن آلی، رس و عامل فرسایش‌پذیری خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند، کاربری جنگل و اراضی بدون پوشش به ترتیب دارای بالاترین و کم‌ترین شاخص کیفیت خاک بودند. هوانگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثرات جنگل‌زدایی و کشت ذرت بر کیفیت خاک در دو کاربری جنگل و اراضی زراعی و در عمق ۰ تا ۱۴۰ سانتی‌متر در مناطق گرمسیری چین پرداختند. با توجه به نتایج دریافتند که کاربری جنگل در مقایسه با اراضی زراعی از شاخص کیفیت خاک بالاتری برخوردار بود و با افزایش عمق میزان آن کاهش داشت. در پژوهشی در مازندران دریافتند که از ۸ ویژگی مورد بررسی، کربن آلی، pH، کلسیم کربنات معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند. مقادیر شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با نمره‌دهی غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود و شاخص کیفیت نمورو در مقایسه با شاخص تجمعی و ساده کیفیت خاک دارای برآورد بهتری بود. کاربری جنگل و زراعی دیم‌زار به ترتیب از بالاترین و کم‌ترین مقادیر شاخص کیفیت خاک در دو روش نمره‌دهی برخوردار بودند (زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه‌ای ژانگ و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی کیفیت خاک در جنگل دست‌کاشت، بوته‌زار، مرتع و کشاورزی با استفاده از روش نمره‌دهی غیر خطی در مناطق نیمه گرمسیری چین پرداختند. کاربری جنگل در مقایسه با سایر کاربری‌ها دارای میزان کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فسفر قابل دسترس بالاتر و میزان رس پایین‌تر بود. ویژگی‌های خاک شامل کربن آلی خاک، سیلت، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، ضخامت خاک، میزان رطوبت خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب شدند. جنگل و اراضی کشاورزی به ترتیب از بالاترین و کم‌ترین مقدار شاخص کیفیت خاک در مجموعه داده کل و مجموعه داده حداقل برخوردار بودند.

روش‌های غیرخطی نیاز به اطلاعات کامل‌تری در مورد سیستم‌های خاک و گیاه در منطقه مورد مطالعه نسبت به روش‌های خطی دارند. هم‌چنین محاسبات ریاضی روش‌های نمره‌دهی غیرخطی از پیچیدگی بیش‌تری در مقایسه با روش‌های خطی برخوردار است. این تفاوت‌ها در روش‌های نمره‌دهی به پیچیدگی و شرایط به خصوص خاک‌ها و کاربری اراضی در منطقه مطالعاتی ارتباط دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۸a). نتایج سایر مطالعات، مطابق پژوهش حاضر برتری روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش خطی را نشان داده است (نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸a؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸b). محققین معتقدند که استفاده از روش‌های غیرخطی برای تعیین کیفیت خاک اگرچه دشوار است اما می‌تواند کارکردهای سیستم را بهتر از روش خطی نشان دهد (عسکری و هولدن، ۲۰۱۴؛ رئیسی و کبیری، ۲۰۱۶).

به طور معمول مجموع کل ویژگی‌های خاک، مورد آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار می‌گیرد. این امر ممکن است سبب شود که برخی از ویژگی‌های تاثیرگذار فیزیکی یا شیمیایی خاک به عنوان مجموعه داده حداقل انتخاب نشده و حساسیت شاخص کیفیت خاک نسبت به تغییرات کیفیت خاک کاهش یافته و نتایج حاصل از صحت قابل قبولی برخوردار نباشند (زوبر و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعه، از دو روش شامل مجموعه داده حداقل (MDS₁) و مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده (MDS₂) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که MDS₂ در مقایسه با MDS₁ از نتایج بهتری برخوردار است و کاربری جنگل (کاربری شاهد) در مقایسه با دو کاربری مرتع و زراعی دارای مقادیر شاخص کیفیت خاک بالاتری بود. در مطالعات گوناگون، شاخص کیفیت خاک مناسب با توجه به اثر معنی‌داری بالاتر انتخاب شده است (یو و همکاران، ۲۰۱۸b؛ زراعت‌پیشه و همکاران، ۲۰۲۰). حمیدی نهرانی و همکاران (۱۳۹۹) به منظور تعیین مناسب‌ترین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک با آنالیز تجزیه

نسبت کارایی معیاری است که در بررسی کارایی شاخص کیفیت خاک در توصیف وضعیت کلی خاک کاربرد دارد (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعات گوناگون جهت ارزیابی شاخص کیفیت از نسبت کارایی استفاده شده است (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲). در این پژوهش، MDS_2 که شامل ویژگی‌هایی چون سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس است در مقایسه با MDS_1 با دارا بودن میزان نسبت کارایی ۸۰ درصد از کارایی بالاتری برخوردار بود و می‌توان اظهار داشت که وضعیت کیفیت خاک را به خوبی می‌تواند توصیف نماید (جدول ۷). با فرض اینکه دو معیار شاخص حساسیت و نسبت کارایی سهم و تاثیر یکسانی در انتخاب شاخص کیفیت خاک مناسب و کارآمد دارند (شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹)، رتبه‌های دو معیار مورد نظر برای هر شاخص کیفیت خاک تجمیع شدند. بدین ترتیب براساس اولویت‌دهی، شاخص کیفیت خاک با رتبه ۱، برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است که $SQI_{W2-MDS2-NLS}$ و $SQI_{W2-MDS1-LS}$ به ترتیب از بالاترین و پایین‌ترین رتبه برخوردار بودند (شکل ۳).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثر جنگل‌تراشی بر کیفیت خاک با استفاده از تحلیل‌های چند متغیره در منطقه سی‌دشت استان گیلان بررسی شد. در MDS_2 که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به طور مجزا مورد تجزیه به مولفه‌های اصلی قرار گرفتند؛ سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، واکنش خاک، کلسیم کربنات معادل و فسفر قابل دسترس به عنوان ویژگی‌های مجموعه داده حداقل تصحیح‌شده تعیین شدند. نتایج نشان داد که MDS_2 در روش نمره‌دهی غیرخطی تفاوت بین کاربری‌های اراضی از نظر شاخص کیفیت خاک را نشان

به مولفه‌های اصلی به بررسی ویژگی‌های خاک به طور جداگانه و مجموع کل ویژگی‌های خاک به روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی در دو کاربری کشاورزی آبی و دیم پرداختند و نشان دادند که هر دو روش محاسباتی کارایی لازم برای ارزیابی کیفیت خاک را داشتند و روش نمره‌دهی خطی در مقایسه با غیرخطی از معنی‌داری بالاتری برخوردار بود. نتایج پژوهش دیگری نشان داد که آنالیز تجزیه به مولفه‌های اصلی ویژگی‌های خاک به طور مجزا و روش نمره‌دهی غیرخطی جهت ارزیابی کیفیت خاک از کارایی بهتری برخوردار است (یو و همکاران، ۲۰۱۸a) که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

تعیین شاخص حساسیت یکی از روش‌هایی است که در مطالعات گوناگون به مقایسه شاخص‌های مختلف کیفیت خاک پرداخته و بر این اساس شاخص کیفیت خاک با کارایی بهتر انتخاب می‌گردد (مامه پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۰؛ سلمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شیدای کرکج و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعه حاضر، اغلب شاخص‌های کیفیت خاک بر اساس MDS_2 در مقایسه با MDS_1 و همچنین در روش نمره‌دهی غیرخطی در مقایسه با روش خطی از شاخص حساسیت بالاتری برخوردار بودند که بیانگر حساسیت بیشتر و مناسب بودن آن‌ها در محاسبه شاخص کیفیت خاک است (مامه پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ نبی‌اللهی و همکاران، ۲۰۱۸a). بیش‌ترین شاخص حساسیت برای $SQI_{W1-MDS2-NLS}$ و $SQI_{W2-MDS2-NLS}$ به ترتیب ۲/۳۵ و ۳/۱۴ به دست آمد (جدول ۶). به این ترتیب شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS_2 ($SQI_{W2-MDS2-NLS}$) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود که در مقایسه با سایر روش‌های محاسباتی، تغییر در شیوه‌های مدیریتی را به خوبی نشان می‌دهد و با نتایج سایر مطالعات (چن و همکاران، ۲۰۱۳؛ سلمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۲) مطابقت دارد.

درصد در مقایسه با MDS₁ از کارایی بالاتری برخوردار بود. بر اساس اولویت‌دهی نهایی و با در نظر گرفتن مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی مشخص می‌شود که SQIW₂-MDS₂-NLS در اولین رتبه قرار گرفته و به عنوان مناسب‌ترین شاخص کیفیت خاک می‌تواند تغییر در شیوه‌های مدیریتی و وضعیت کلی خاک در اثر جنگل‌تراشی در منطقه مورد مطالعه را نشان دهد. با توجه به کاهش میزان کیفیت خاک در کاربری زراعی، جلوگیری از تغییر کاربری اراضی از اقدامات ضروری به منظور مدیریت پایدار خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

داده اما در روش خطی، اختلاف معنی‌داری بین شاخص کیفیت خاک کاربری‌های مختلف مشاهده نشد. همچنین با در نظر گرفتن مجموع رتبه‌های شاخص حساسیت و نسبت کارایی برای اولویت‌دهی نهایی، رتبه بهتر روش نمره‌دهی غیر خطی در مقایسه با روش خطی در MDS₂ مشخص می‌شود. بنابراین می‌توان اظهار داشت که استفاده از روش‌های غیرخطی برای تعیین کیفیت خاک می‌تواند کارکردهای خاک را بهتر از روش خطی نشان دهد. شاخص کیفیت خاک با روش وزن‌دهی واریانس و نمره‌دهی غیرخطی در MDS₂ (SQIW₂-MDS₂-NLS) دارای بالاترین میزان شاخص حساسیت (۳/۱۴) بود. همچنین MDS₂ با دارا بودن میزان راندمان ۸۰

فهرست منابع

۱. بنایی م. ح. ۱۳۷۷. نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی خاکهای ایران. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. تهران، ایران.
۲. تقی پور، م.، یغمائیان مهابادی، ن و م. شعبانپور شهرستانی. ۱۳۹۸. اثر تغییر کاربری اراضی بر میزان کربن آلی خاک در منطقه توتکابن استان گیلان. پژوهش‌های خاک، جلد ۳۳، شماره ۴، صفحه: ۵۷۷-۵۹۰.
۳. حمیدی نهرانی، س.، م. ص. عسکری، س. سعادت، م. الف. دلاور و م. طاهری. ۱۳۹۹. استفاده از تحلیل چندمتغیره به منظور ارزیابی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان زنجان. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۸، شماره ۲، صفحه: ۱۷۳-۱۵۸.
4. Amoakwah, E., M.A. Rahman, K.A. Nketia, R. Djouaka, N.O. Didenko, and K.R. Islam. 2021. Impact of deforestation and subsequent land-use change on soil quality. *Eurasian Journal of Soil Science* 10(2): 150-160.
5. Armenise, E., M.A. Redmile-Gordon, A.M. Stellacci, A. Ciccarese, and P. Rubino. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 130: 91-98.
6. Askari, M.S. and N.M. Holden. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research* 150: 57-67.
7. Ayoubi, S., and S. Moazzeni Dehaghani. 2020. Identifying impacts of land use change on soil redistribution at different slope positions using magnetic susceptibility. *Arabian Journal of Geosciences* 13: 1-11.
8. Bakhshandeh, E., M. Hossieni, M. Zeraatpisheh, and R. Francaviglia. 2019. Land use change effects on soil quality and biological fertility: a case study in northern Iran. *European Journal of Soil Biology* 95: 103119.
9. Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* 5: 363-375.
10. Bremner, J.M. 1960. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *The Journal of Agricultural Science* 55(1): 11-33.

11. Chandel, S., M.S. Hadda, and A.K. Mahal. 2018. Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of Submontane Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49(6): 658-674.
12. Chen, Y.D., H.Y. Wang, J.M. Zhou, L. Xing, B.S. Zhu, Y.C. Zhao, and X.Q. Chen. 2013. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. *Pedosphere* 23(5): 564-576.
13. Davari, M., L. Gholami, K. Nabiollahi, M. Homaei, and H.J. Jafari. 2020. Deforestation and cultivation of sparse forest impacts on soil quality (case study: West Iran, Baneh). *Soil and Tillage Research* 198: 104504.
14. Dengiz, O. 2020. Soil quality index for paddy fields based on standard scoring functions and weight allocation method. *Archives of Agronomy and Soil Science* 66(3): 301-315.
15. Doran, J.W., and T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment* 35: 1-21.
16. Dou, Y., Y. Yang, S. An, and Z. Zhu. 2020. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China. *Catena* 185: 104294.
17. Duan, L., H. Sheng, H. Yuan, Q. Zhou, and Z. Li. 2021. Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in subtropical China. *Geoderma* 389: 114953.
18. Fathizad, H., M.A.H. Ardakani, B. Heung, H. Sodaiezhadeh, A. Rahmani, A. Fathabadi, T. Scholten, and Taghizadeh-Mehrjardi R. 2020. Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators* 118: 106736.
19. Gee, G.W., J.W. Bauder, and A. Klute. 1986. *Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America Book Series. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, 404-410.
20. 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 and tillage research* 87(2): 163-174.
21. Huang, W., M. Zong, Z. Fan, Y. Feng, S. Li, C. Duan, and H. Li. 2021. Determining the impacts of deforestation and corn cultivation on soil quality in tropical acidic red soils using a soil quality index. *Ecological Indicators* 125: 107580.
22. Karlen, D.L., C.A. Ditzler, and S.S. Andrews. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114(3-4): 145-156.
23. Kemper, W.D., and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution.
24. Liu, M., G. Han, Z. Li, Q. Zhang, and Z. Song. 2019. Soil organic carbon sequestration in soil aggregates in the karst Critical Zone Observatory, Southwest China. *Plant, Soil and Environment* 65(5): 253-259.
25. Liu, M., G. Han, Z. Li, T. Liu, X. Yang, Y. Wu, and Z. Song. 2017. Effects of slope position and land use on the stability of aggregate-associated organic carbon in calcareous soils. *Acta Geochimica* 36(3): 456-461.
26. Mamehpour, N., S. Rezapour, and N. Ghaemian. 2021. Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem. *Geoderma* 382: 114781.

27. Marzaioli, R., R. d'Ascoli, R.A. De Pascale, and F.A. Rutigliano. 2010. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology* 44(3): 205-212.
28. Nabiollahi, K., F. Golmohamadi, R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, and M. Davari. 2018a. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16-28.
29. Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, and S. Eskandari. 2018b. Assessing and monitoring the soil quality of forested and agricultural areas using soil-quality indices and digital soil-mapping in a semi-arid environment. *Archives of Agronomy and soil science* 64(5): 696-707.
30. Nabiollahi, K., R. Taghizadeh-Mehrjardi, R. Kerry, and S. Moradian. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological indicators* 83: 482-494.
31. Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanable and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate; United States Department of Agriculture: Washington, D. C., USDA Circular 939.
32. Qi, Y., J.L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149(3-4): 325-334.
33. Rahmanipour, F., R. Marzaioli, H.A. Bahrami, Z. Fereidouni, and S.R. Bandarabadi. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological indicators* 40: 19-26.
34. Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators* 75: 307-320.
35. Raiesi, F. and V. Kabiri. 2016. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators* 71: 198-207.
36. Rezaee, L., A.A. Moosavi, N. Davatgar, and A.R. Sepaskhah. 2020. Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators* 117: 106566.
37. Rezapour, S., and O. Alipour. 2017. Degradation of Mollisols quality after deforestation and cultivation on a transect with Mediterranean condition. *Environmental Earth Sciences* 76(22): 1-13.
38. Rhoades, J.D. 1983. Soluble salts. In: A. L. Page (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* ASA / SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 167-179.
39. Santos-Francés, F., A. Martínez-Graña, C. Ávila-Zarza, M. Criado, and Y. Sánchez. 2019. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma* 354: 113872.
40. Sione, S.M.J., M.G. Wilson, M. Lado, and A.P. González. 2017. Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a Vertisol, using a soil quality index. *Catena* 150: 79-86.
41. Selmy, S. A., A. Al-Aziz, H., Salah, R. Jiménez-Ballesta, F. Jesús García-Navarro, and M.E. Fadl. 2021. Soil Quality Assessment Using Multivariate Approaches: A Case Study of the Dakhla Oasis Arid Lands. *Land* 10(10): 1074.
42. Sheidai Karkaj, E., A. Sepehry, H. Barani, J. Motamedi, and F. Shahbazi. 2019. Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19(3): 648-658.

43. Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Leoppert, N.P. Soltanpour, M.A. Tabatabai, G.T. Johnston, and M.E. Summer. 1996. *Methods of Soil Analysis*, Soil Science Society of American Journal. Book Series No. 5.
44. Tesfahunegn, G.B. 2014. Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science* 2014.
45. Tufa, M., A. Melese, and W. Tena. 2019. Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: the case of Kuyu District, Ethiopia. *Eurasian Journal of Soil Science* 8(2): 94-109.
46. Vasu, D., S.K. Singh, S.K. Ray, V.P. Duraisami, P. Tiwary, P. Chandran, A.M. Nimkar, and S.G. Anantwar. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma* 282: 70-79.
47. Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37(1): 29-38.
48. Walling, D.E., and B.W. Webb. 1980. The spatial dimension in the interpretation of stream solute behavior. *Journal of Hydrology* 47(1-2): 129-149.
49. Yu, P., D. Han, S. Liu, X. Wen, Y. Huang, and H. Jia. 2018a. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. *Catena* 171: 280-287.
50. Yu, P., S. Liu, L. Zhang, Q. Li, and D. Zhou. 2018b. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment* 616: 564-571.
51. Zaher, H., M. Sabir, H. Benjelloun, and H. Paul-Igor. 2020. Effect of forest land use change on carbohydrates, physical soil quality and carbon stocks in Moroccan cedar area. *Journal of environmental management* 254: 109544.
52. Zeraatpisheh, M., E. Bakhshandeh, M. Hosseini, and S.M. Alavi. 2020. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma* 363: 114139.
53. Zhang, Y., X. Xu, Z. Li, C. Xu, and W. Luo. 2021. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst. *Science of the Total Environment* 775: 145876.
54. Zhao, F.Z., L. Bai, J.Y. Wang, J. Deng, J.C. Ren, X.H. Han, G.H. Yang, and J. Wang 2019. Change in soil bacterial community during secondary succession depend on plant and soil characteristics. *Catena* 173: 246-252.
55. Zhou, M., Y. Xiao, Y. Li, X. Zhang, G. Wang, J. Jin, G. Ding, and X. Liu. 2022. Soil quality index evaluation model in responses to six-year fertilization practices in Mollisols. *Archives of Agronomy and Soil Science* 68(2): 180-194.
56. Zuber, S.M., G.D. Behnke, E.D. Nafziger, M.B. Villamil. 2017. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. *Soil Tillage Research* 174:147-155

Evaluation of Scoring and Weighting Methods for Soil Characteristics to Determine Soil Quality in Different Land Uses

F. Samie Khoshkestalkhi, N. Yaghmaeian*, S. Abrishamkesh, and A. Maslahatjou

PhD student, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
E-mail: fatemehsamie727@gmail.com
Associated Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
E-mail: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir
Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran;
E-mail: sabrishamkesh@guilan.ac.ir
MSc., General Office of Natural Resources and Watershed Management of Guilan Province, Rasht, Iran.

Received: April 8, 2023 and Accepted: January 2, 2024

Abstract

Forests have important role for ecosystem maintenance, and deforestation is one of the factors in degradation of soil quality. In this study, using multivariate analysis, soil quality index was evaluated in three land uses including forest, grassland, and cropland at two depths of 0-10 and 10-20 cm in Sidasht of Guilan Province, Iran. The weighted additive soil quality was calculated using two methods: (1) Minimum data set (MDS₁) and (2) Revised minimum data set (MDS₂). Also, each feature's variance and communalities and two scoring methods, namely, linear and non-linear, were compared and evaluated. In MDS₂, the effects of land use on soil quality index (SQI) indicated that the mean values calculated by the non-linear scoring method was significantly more precise than the linear one. Soil quality indices in forest and grassland had the maximum values when compared to cropland. SQI_{W2-MDS2-NLS} had the highest sensitivity index (SI= 3.14). In MDS₂, the soil properties including silt, Mean Weight Diameter, pH, CaCO₃ and available phosphorus were selected. Efficiency ratio of MDS₂ was 80% and in soil quality assessment, MDS₂ had higher efficiency than MDS₁. Soil condition and change of soil management practices were reflected in MDS₂ more clearly than in MDS₁. Accordingly, SQI_{W2-MDS2-NLS} method was the best means for evaluating the effects of deforestation on soil quality in the studied area.

Keywords: Soil quality index, Land use change, Revised minimum data set, Deforestation

* Corresponding author's email: yaghmaeian_na@guilan.ac.ir