

ارزیابی کمی کیفیت خاک در کاربری‌ها و شیب‌های مختلف در حوزه آبخیز بابلرود، جنوب استان مازندران

فاطمه آقاری^۱، الهام چاوشی^{۲*}، ستار چاوشی بروجنی^۳، ناصر هنرجو^۴، احمد جلالیان^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸)

چکیده

کیفیت خاک تحت تأثیر کاربری اراضی و درجه شیب قرار می‌گیرد و ارزیابی آن نقش مهمی در توسعه پایدار و مدیریت منابع خاک دارد. این پژوهش به منظور ارزیابی کیفیت خاک در کاربری‌ها و شیب‌های مختلف در حوزه آبخیز بابلرود در جنوب استان مازندران انجام شد. فاکتورهای مورد مطالعه شامل کاربری اراضی در پنج سطح (جنگل طبیعی، مرتع، شالیزار، باغ مرکبات و اراضی زراعی) و کلاس شیب در پنج سطح (۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲ و شیب بالای ۱۲ درصد) می‌باشند. ۸۹ نقطه نمونه برداری تعیین و نمونه برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک انجام شد. هفده ویژگی خاک شامل قابلیت هدایت الکتریکی، اسیدیته، کربن آلی، نیتروژن کل، درصد شن، سیلت و رس، تخلخل، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه، درصد خاکدانه‌های درشت و ریز، درصد آهک، رس قابل پراکنش در آب، کربن آلی ذره‌ای، کربن آلی عجین شده با بخش معدنی و ذخیره کربن آلی به‌عنوان مجموعه کل ویژگی‌ها (TDS) در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) پنج ویژگی ذخیره کربن آلی، درصد خاکدانه‌های درشت، قابلیت هدایت الکتریکی، درصد سیلت و رس به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر (MDS) انتخاب شدند. در ادامه کیفیت خاک با استفاده از دو شاخص کیفیت تجمعی (SQI_a) و کیفیت وزن دار (SQI_w) و هر کدام در دو مجموعه TDS و MDS به دو روش خطی و غیرخطی ارزیابی شدند. نتایج هشت شاخص کیفیت خاک نشان داد جنگل با درجه خوب و خیلی خوب دارای بهترین کیفیت و شالیزار دارای ضعیف‌ترین کیفیت خاک است. در بین شاخص‌های ارزیابی شده، تنها شاخص SQI_w-TDS-NL کاهش کیفیت خاک با افزایش درجه شیب را نشان داد. وجود ضرائب تبیین ۰/۸۲ و ۰/۸۹ بین دو مجموعه MDS و TDS به ترتیب در SQI_a و SQI_w به روش غیرخطی، نشان‌دهنده امکان استفاده از MDS بجای TDS در منطقه مطالعاتی است. همچنین با توجه به ضریب همبستگی ۰/۸۵ بین ذخیره کربن آلی و SQI_w-MDS-NL، شاخص SQI_w-MDS-NL برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت تجمعی، کیفیت وزن‌دهی شده، حداقل داده‌های مؤثر، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

آقاری ف.، چاوشی ا.، چاوشی بروجنی س.، هنرجو ن.، جلالیان ا. ۱۴۰۲. ارزیابی کمی کیفیت خاک در کاربری‌ها و شیب‌های مختلف در حوزه آبخیز بابلرود، جنوب استان مازندران. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه: ۹۵-۱۱۲.

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران
- ۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران (مکاتبه کننده)
- ۳- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان
- ۴- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران
- ۵- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

* پست الکترونیک: chavoshie@yahoo.com

مقدمه

خاک به عنوان یک منبع طبیعی، کارکردهای کلیدی زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارد. این کارکردها، توسط کیفیت خاک کنترل می شوند و در طول زمان و مکان تغییر می کنند. کیفیت خاک عبارت است از توانایی خاک در انجام وظایف خود به عنوان یک سیستم حیاتی زنده در اکوسیستم و تحت کاربری های مختلف، به نحوی که علاوه بر حفظ حاصلخیزی زیستی، کیفیت محیط زیست را بهبود بخشیده و تامین کننده سلامت انسان، حیوان و گیاه باشد (Doran & Parkin, 1994). کیفیت خوب خاک علاوه بر افزایش حاصلخیزی و عملکرد محصول، به بهبود کیفیت آب و هوا نیز کمک می کند (Griffiths *et al.*, 2010). کیفیت خاک در طول زمان تحت تاثیر فاکتورهای مختلفی نظیر نوع کاربری اراضی، توپوگرافی و فرسایش خاک تغییر می کند (Compos *et al.*, 2007).

در دهه های اخیر مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی کیفیت خاک در کاربری های مختلف انجام شده است. به عنوان مثال علی دوست و همکاران (Alidoust *et al.*, 2018) کیفیت خاک چهار کاربری مرتع، جنگل، دیمزار و کشت آبی را در حوزه آبخیز لردگان بررسی کردند. نتایج این محققین نشان دهنده کیفیت خوب خاک های جنگل و کیفیت نامناسب خاک دیمزارهای منطقه بود. وارسته خانلری و همکاران (Varasteh Khanlari *et al.*, 2020) نیز در پژوهشی به ارزیابی کیفیت خاک پنج کاربری جنگل طبیعی، جنگلهای دست کاشت (صنوبر، توسکا و دارتالاب) و شالیزار در شهرتان آستانه اشرفیه در استان گیلان پرداختند. نتایج آنها نشان داد که بعد از جنگل طبیعی، جنگل دست کاشت با پوشش گیاهی صنوبر نقش موثرتری در مقایسه با سایر پوشش های گیاهی در افزایش برخی ویژگی های خاک نظیر میانگین وزنی قطر خاکدانه، هدایت هیدرولیکی اشباع و کربن زیست توده میکروبی و در نتیجه بهبود کیفیت خاک دارد.

علاوه بر اثر کاربری اراضی، توپوگرافی نیز به عنوان یک فاکتور خاکساز، بر تغییرات محلی کیفیت خاک مؤثر است. فاکتورهای توپوگرافی با ارتفاع، جهت و درجه شیب مشخص می شوند و نقش مهمی در تغییرات مکانی خصوصیات خاک دارند (Anteneh Wubie & Assen, 2020).

(2020). مطالعات نشان می دهد که شیب های با درجه زیاد به دلیل فرسایش خاک سطحی، کیفیت خاک ضعیفتری در مقایسه با شیب های با درجه کم دارند (Anteneh Wubie & Assen, 2020). در همین زمینه پژوهشی در حوضه آبخیز سد طرق واقع در جنوب شرق مشهد انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در دامنه های جنوبی، بین مقادیر عددی شاخص کیفیت خاک در درجات مختلف شیب (شیب های کمتر از ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و بیشتر از ۳۰ درصد) تفاوت معنی داری وجود دارد و مقادیر کیفیت خاک در شیب ۲۰ تا ۳۰ درصد، کمتر از سایر شیب ها می باشد. همچنین مقادیر عددی شاخص کیفیت خاک در شیب های شمالی بطور معنی داری بیشتر از شیب های جنوبی است (Soofi *et al.*, 2016). در حوزه آبخیز گومارا نیز مشاهده شد که اثرات تلفیقی کاربری اراضی و درجه شیب، باعث تغییرات معنی دار کیفیت خاک منطقه شده است (Anteneh Wubie & Assen, 2020). کاربری های مختلف اراضی و درجات شیب، نه تنها باعث تغییر در مقادیر ویژگی های خاک می شوند بلکه تغییر در توزیع مکانی این ویژگی ها را در پی دارند. درجات مختلف شیب از طریق انتقال رس ها و ماده آلی به قسمت های پایین شیب و تغییر در جرم مخصوص ظاهری، کیفیت خاک را تحت تأثیر قرار می دهند (Yuan & Mangan, 2008).

ارزیابی کیفیت خاک با بررسی ویژگی ها و فرایندهای فیزیکی، شیمیایی یا زیستی خاک که تحت تاثیر مدیریت خاک قرار می گیرند، انجام می شود (Andrews *et al.*, 2004) و می تواند یک رویکرد عملی برای تشخیص زودهنگام اثرات نامطلوب شیوه های مدیریتی باشد (Askari & Holden, 2015). اما بیان کمی کیفیت خاک بطور مستقیم بسیار دشوار است. به همین دلیل کاربرد یک مجموعه از ویژگی هایی که بیانگر توانایی خاک برای انجام وظایف اساسی آن باشد، پیشنهاد شده است. پژوهشگران مجموعه های مختلفی از ویژگی های خاک را برای تعیین شاخص کیفیت خاک پیشنهاد کرده اند. بسیاری از پژوهشگران، شاخص کیفیت خاک را بر اساس کل ویژگی های مؤثر بر کیفیت خاک (TDS) تعیین کرده اند (Doran & Jones, 1996) و

قائمی و همکاران (Ghaemi *et al.*, 2013)، موخرجی و لال (Mukherjee & Lal, 2014)، واسو و همکاران (Guo *et al.*, 2016)، گو و همکاران (Vasu *et al.*, 2016)، بهمنی و همکاران (Bahmani *et al.*, 2019)، یغمائیان مهابادی و همکاران (Yaghmaeian Mahabadi *et al.*, 2020) نیز از شاخص‌های کیفیت نمره، کیفیت تجمعی و کیفیت وزن‌دار برای ارزیابی کمی کیفیت خاک استفاده نمودند.

حوزه آبخیز بابلرود در جنوب استان مازندران واقع شده است. در این حوزه، کاربری‌های مختلف مرتع، جنگل، شالیزار، اراضی زراعی و باغات در سطوح مختلف شیب وجود دارد، اما فقدان مطالعات کافی در زمینه بررسی اثرات کاربری و شیب بر کیفیت خاک این منطقه کاملاً مشهود می‌باشد. لذا این پژوهش با هدف ارزیابی کمی کیفیت خاک در کاربری‌های مختلف (جنگل، مرتع، شالیزار، اراضی زراعی و باغ مرکبات) و درجات مختلف شیب با استفاده از دو مدل SQI_w و SQI_a در حوزه آبخیز بابلرود انجام شد.

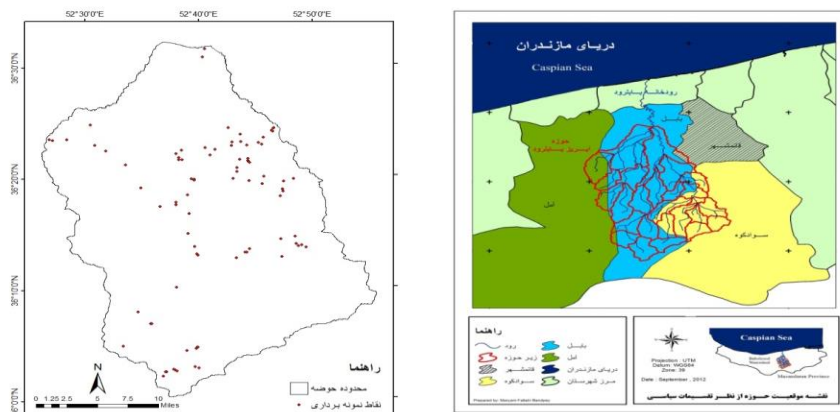
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز بابلرود در جنوب استان مازندران و در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ}9'$ تا $36^{\circ}21'$ عرض شمالی و $52^{\circ}36'$ تا $52^{\circ}37'$ طول شرقی واقع شده و مساحت آن بالغ بر 51725 هکتار است. شکل ۱ موقعیت مکانی و نقاط نمونه‌برداری حوزه آبخیز بابلرود را نشان می‌دهد. حداکثر ارتفاع حوزه 3711 متر در بخش جنوبی و حداقل آن 8 متر در بخش شمالی حوزه و متوسط ارتفاع حوزه 767 متر از سطح دریای آزاد می‌باشد. میانگین بارندگی سالیانه در سطح حوزه و میانگین دمای سالیانه به ترتیب 782 میلی‌متر و $14/1$ درجه سانتی‌گراد است. حدود $26/5$ درصد سطح حوزه مورد مطالعه دارای شیب کمتر از 5 درصد و حدود $7/5$ درصد سطح حوزه دارای شیب بیش از 60 درصد می‌باشد و غالباً دارای خاک بسیار کم عمق است. حدود 3 درصد از سطح حوزه عاری از پوشش گیاهی بوده (ارتفاعات ضلع جنوبی حوزه) و بقیه سطح حوزه را مرتع، جنگل و اراضی زراعی و باغی پوشانده است (Karami *et al.*, 2015).

برخی از پژوهش‌گران، تعداد محدودتری از ویژگی‌های خاک را که نماینده بهتری از کیفیت خاک باشند، به عنوان مجموعه حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) پیشنهاد نموده‌اند (Qi *et al.*, 2009). با توجه به اینکه تفسیر تعداد زیاد ویژگی‌ها مشکل است، توصیه شده است که مجموعه ویژگی‌ها در قالب یک شاخص تحت عنوان شاخص کیفیت خاک تلفیق گردند.

امروزه شاخص‌های کمی زیادی مانند شاخص کیفیت تجمعی (SQI_a)، شاخص کیفیت نمره (SQI_n) و شاخص کیفیت وزن‌دار (SQI_w) برای محاسبه کیفیت خاک ارائه و مطالعات مختلفی در این زمینه انجام شده است. به عنوان مثال همتی‌فرد و همکاران (Hemati fard *et al.*, 2018) با ارزیابی کمی کیفیت خاک دشت شهرکرد گزارش کردند که شاخص‌های SQI_n و SQI_a از کارایی خوبی برای ارزیابی کیفیت خاک کاربری‌های مختلف برخوردارند. همچنین بر اساس نتایج آنها وجود ضرایب تبیین $0/97$ و $0/98$ بین دو مجموعه TDS و MDS در SQI_n و SQI_a نشان‌دهنده امکان استفاده از MDS به جای TDS در منطقه مطالعاتی بود. میرخانی و همکاران (Mirkhani *et al.*, 2020) نیز در ارزیابی کیفیت خاک منطقه ساوجبلاغ استان البرز با استفاده از سه شاخص SQI_a ، SQI_w و SQI_n بیان کردند که شاخص SQI_n با استفاده از TDS، دقت بیشتری ($R^2 = 0/78$) برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه دارد. نبی‌الهی و همکاران (Nabiollahi *et al.*, 2018) از شاخص‌های SQI_w ، SQI_a و SQI_n برای ارزیابی اثر شیب و کاربری اراضی بر کیفیت خاک بخشی از استان کردستان استفاده کردند. نتایج این محققین نشان داد که مقادیر هر سه شاخص کیفیت خاک، در اراضی کشاورزی و در درجات زیاد شیب بطور معنی‌داری کمتر از درجات کمتر شیب است. از سوی دیگر در مطالعه آنها، SQI_w در مقایسه با دو شاخص دیگر، کیفیت خاک منطقه را بهتر ارزیابی نمود ($R^2 = 0/78$). همچنین این محققین بیان کردند که چرای بی‌رویه دام در مراتع منطقه، باعث کاهش کیفیت خاک شده است به نحوی که کیفیت خاک مراتع با اراضی کشاورزی تفاوت معنی‌داری ندارد. پژوهش‌گران متعدد دیگری نظیر شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2011)،



شکل ۱- موقعیت مکانی و نقاط نمونه‌برداری در ناحیه مطالعاتی در حوزه آبخیز بابلرود
Figure 1. Location map and sampling point of the study area within the Babolrood watershed

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک و با استفاده از دستگاه EC متر، اسیدیته (pH) در عصاره اشباع خاک و با استفاده از دستگاه pH متر، کربن آلی (OC) به روش والکلی و بلاک (Walkley & Black, 1934)، نیتروژن کل (T.N) به روش برنر (Bremner, 1982)، درصد شن و سیلت و رس به روش جی و باوذر (Gee & Bauder, 1986)، رس قابل پراکنش (WDC) به روش هیدرومتری (et al., 1984)، جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش کلوخه و پارافین (Blake & Hartge, 1986) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش غربال مرطوب و با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده طبق رابطه (۱) محاسبه شد (Marquez et al., 2004):

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

x_i (L): متوسط قطر یا اندازه خاکدانه‌ها در هر کلاس
 w_i (M): نسبت وزن خاکدانه‌ها بر روی هر الک به کل خاک
 W_i (M): وزن خاکدانه‌ها در هر کلاس مربوطه است.

درصد خاکدانه‌های درشت (< ۲۵۰ میکرومتر) و خاکدانه‌های ریز (> ۲۵۰ میکرومتر) به روش بیکر و همکاران (Baker et al., 2004) اندازه‌گیری شد. تخلخل خاک از رابطه (۲) بدست آمد که در این رابطه BD جرم

مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

در ابتدا برای تعیین نقاط نمونه‌برداری، نقشه کاربری اراضی و نقشه شیب (مطالعات توجیهی مدیریت جامع منابع طبیعی و آبخیزداری حوزه آبخیز بابلرود، ۱۳۹۲) روی هم قرار داده شد و موقعیت ۸۹ نقطه نمونه‌برداری استخراج شد. سپس با استفاده از دستگاه مکان‌یاب جهانی (GPS) نقاط مورد نظر در سطح منطقه مکان‌یابی شدند. نقاط نمونه‌برداری در پنج کاربری زمین توزیع شدند به گونه‌ای که ۱۵ نمونه در مرتع، ۱۸ نمونه در اراضی زراعی، ۱۸ نمونه در شالیزار، ۱۹ نمونه در باغات و ۱۹ نمونه در اراضی جنگلی قرار گرفته‌اند. این نقاط در ۵ دسته شیب توزیع شده‌اند که عبارتند از: ۱۸ نمونه در شیب ۰-۲ درصد، ۱۸ نمونه در شیب ۲-۵ درصد، ۱۸ نمونه در شیب ۵-۸ درصد، ۱۷ نمونه در شیب بالای ۱۲ درصد.

در هر نقطه مشاهداتی، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک بصورت مرکب انجام شد بدین صورت که در چهار گوشه و مرکز یک مربع با ابعاد ۱×۱ متر مربع، پنج نمونه خاک برداشت و با هم مخلوط شدند و نهایتاً یک نمونه خاک از آن استخراج گردید. بعد از جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها، ۱۷ ویژگی خاک در آنها اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های مورد بررسی و روش اندازه‌گیری آنها به شرح زیر است:

مهمترین نشان‌گرها در داخل هر مؤلفه اصلی انتخاب می‌گردد. به این صورت است که درون هر مؤلفه اصلی، نشان‌گری که دارای بیشترین وزن باشد به همراه نشان - گرهایی که دارای اختلاف کمتر از ۱۰ درصد با آن باشند، به عنوان MDS انتخاب شدند. زمانی که بیشتر از یک ویژگی برای هر مؤلفه، باقی ماند، ضریب همبستگی بین شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های با ضریب همبستگی معنی‌دار و وزن پائین حذف شدند (et al., 2018).

نمره‌دهی به ویژگی‌های انتخاب‌شده

ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگون و دامنه عددی متفاوت می‌باشند و قابل جمع یا ضرب نمودن نیستند. بنابراین برای اینکه بتوان آنها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، بایستی ابتدا ویژگی‌ها بی‌بعد شوند. برای این منظور از روش نمره‌دهی خطی و غیرخطی استفاده شد (Gou et al., 2017). در روش نمره‌دهی خطی، سه تابع امتیازدهی استاندارد برای نشان‌گرهای مختلف وجود دارد که نشان‌دهنده این است که آیا آن نشان‌گر رابطه "منفی" یا "مثبت" با کیفیت خاک دارد. برای نشان‌گرهایی که با افزایش و یا کاهش مقدار آن‌ها، کیفیت خاک بهبود می‌یابد، به ترتیب توابع "بیشتر-بهتر" و "کمتر-بهتر" و برای نشان‌گرهایی که دارای دامنه بهینه هستند، تابع "دامنه بهینه" استفاده شد (Hussain et al., 1999; Karlen & Scott, 1994).

(جدول ۱).
امتیازدهی خطی برای توابع "بیشتر-بهتر" (رابطه ۴)، "کمتر-بهتر" (رابطه ۵) و "دامنه بهینه" (رابطه ۶ و ۷) با استفاده از روابط ۴ تا ۷ محاسبه شد.

$$SL = \frac{x-1}{h-1} \quad (4)$$

$$SL = 1 - \frac{x-1}{h-1} \quad (5)$$

$$SL = \frac{x-1}{h-1} \text{ if } x > 0 \quad (6)$$

$$SL = 1 - \frac{x-1}{h-1} \text{ if } x < 0 \quad (7)$$

که در آن SL امتیاز خطی بین ۰ و ۱، x مقدار متغیر، l مقدار مینیمم، h مقدار ماکزیمم و O آستانه بهینه است (Masto et al., 2008).

برای امتیازدهی غیرخطی از تابع سیگموئیدی زیر (رابطه ۸) استفاده شد (Bastida et al., 2006):

$$SNL = \frac{a}{(1+(x/x_0)^b)} \quad (8)$$

مخصوص ظاهری و PD جرم مخصوص حقیقی خاک می‌باشد.

$$f=1-BD/PD \quad (2)$$

میزان ذخیره کربن آلی (OC_{pool}) نیز از رابطه (۳) محاسبه گردید (Guo & Gifford, 2002). در این رابطه OC_{pool} ذخیره کربن آلی (g m⁻²)، BD جرم مخصوص ظاهری (Mg m⁻³)، D عمق خاک (m)، SOC کربن آلی خاک (g kg⁻¹ soil) و ۱۰۰۰ ضریب تبدیل مگاگرم به کیلوگرم می‌باشد.

$$OC_{pool} = BD \times D \times SOC \times 1000 \quad (3)$$

برای اندازه‌گیری کربن آلی ذره‌ای (POC) از روش کامباردلا و همکاران (Cambardella et al., 2001) و برای اندازه‌گیری کربن آلی عجین‌شده با بخش معدنی (MOC) از روش کامباردلا و الیوت (Cambardella & Elliott, 1993) استفاده شد.

انتخاب مجموعه ویژگی‌های حداقل (MDS)

در این پژوهش برای مجموعه کل داده‌ها از هفده ویژگی خاک شامل EC، pH، کربن آلی، نیتروژن کل، درصد شن، سیلت و رس، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه (GMD) و (MWD)، درصد خاکدانه‌های درشت و ریز، رس قابل پراکنش در آب، میزان ذخیره کربن آلی، کربن آلی ذره - ای و کربن آلی عجین‌شده با بخش معدنی استفاده شد. برای گزینش مجموعه‌ی حداقل ویژگی‌ها، به علت قابلیت روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) در انتخاب MDS، از این روش استفاده شد (Doran & Parkin, 1994). این کار با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS انجام شد. روش PCA برای کاهش حجم داده‌ها، به صورت انتخاب ویژگی‌هایی که بیشترین تأثیر را بر کیفیت خاک منطقه دارند از میان کل ویژگی‌های مورد بررسی خاک، استفاده شد.

طبق روشی که توسط اندروز و همکاران (Andrews et al., 2002) و گوارتز و همکاران (Govaerts et al., 2006) برای انتخاب MDS ارائه شده است، مؤلفه‌های با ارزش ویژه^۳ بزرگتر از یک به عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب شدند. بعد از انتخاب تعداد مؤلفه‌های اصلی،

1 Particulate Organic Carbon

2 Mineral-associated organic C

3 eigen values

جهت وزن‌دهی ویژگی‌ها در هر دو مجموعه TDS و MDS سهم هر ویژگی به وسیله روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی محاسبه شد. بدین منظور نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها در دو

که در آن S_{NL} امتیاز غیرخطی متغیر بین صفر و یک، a امتیاز ماکزیمم که در این پژوهش برابر با یک است، x مقدار ویژگی خاک، x_0 میانگین ویژگی مورد مطالعه و b شیب معادله است. مقدار این شیب برای توابع "بیشتر-بہتر" برابر با $2/5-$ و برای توابع "کمتر-بہتر" برابر با $2/5+$ است.

جدول ۱- توابع امتیازدهی برای متغیرهای کیفیت خاک

Table 1. The scoring functions (SSF) for soil quality properties

Functions	Parameters	Optimal Values	References
less is better	Soil bulk density, Calcium carbonate, Micro aggregate, Water dispersible clay, Particulate organic carbon	-	Marzaioli <i>et al.</i> , 2010; Safari <i>et al.</i> , 2019
more is better	Soil organic carbon, Mineral-associated organic matter, Macro aggregate, Total nitrogen, Organic carbon pool, Mean weight diameter of water-stable aggregates, Geometric mean diameter of water-stable aggregates	-	Marzaioli <i>et al.</i> , 2010; Safaei <i>et al.</i> , 2019; Zeraatpisheh <i>et al.</i> , 2020
optimum	Soil porosity, The percentages of Sand, Silt and Clay, pH, EC	EC=0.2- 2 dS m ⁻¹ , pH=7, porosity= 50%, clay= 7-27 %, sand= 23-52 % , silt= 28-50 %	Liebig <i>et al.</i> , 2001; Andrews <i>et al.</i> , 2004

برای فاکتور شیب نیز پنج سطح (۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲ و شیب بالای ۱۲ درصد) در نظر گرفته شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

مجموعه TDS و MDS، به‌عنوان وزن هر ویژگی در نظر گرفته شد (Qi *et al.*, 2009).

محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک

در این مرحله با تلفیق امتیازات و وزن‌های ویژگی‌های مختلف، شاخص کیفیت تجمعی (SQI_a) (Andrews *et al.*, 2002) (رابطه ۹) و شاخص کیفیت وزن‌دار (SQI_w) (Doran & Parkin, 1994) (رابطه ۱۰) محاسبه شدند.

$$SQI_a = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (9)$$

N_i مقدار نمره هر ویژگی و n تعداد ویژگی‌ها است.

$$SQI_w = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (10)$$

W_i وزن هر ویژگی و N_i مقدار نمره هر ویژگی است.

روش‌های تجزیه و تحلیل آماری

در ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و همگنی آنها با آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌های آماری به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام پذیرفت. فاکتورها شامل دو فاکتور کاربری اراضی و شیب بود. برای فاکتور کاربری اراضی پنج سطح (جنگل طبیعی، مرتع، شالیزار، باغ مرکبات و اراضی زراعی) و

نتایج و بحث

مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کاربری‌های مختلف

نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) نشان داد که برای بیشتر ویژگی‌های مورد مطالعه خاک، اثر کاربری اراضی معنی‌دار است. در جدول ۲ نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف ارائه گردیده است. بافت خاک اراضی زراعی، شالیزار و باغ مرکبات رسی، مرتع لومی و جنگل طبیعی لوم رسی است. کمترین pH خاک مربوط به کاربری جنگل است (۶/۷) در حالی که میانگین pH خاک در سایر کاربری‌ها (۷/۳-۷/۲) فاقد تفاوت معنی‌دار است. علت کمتر بودن pH خاک جنگل را می‌توان به وجود ماده آلی بیشتر در خاک جنگل نسبت داد. قابلیت هدایت الکتریکی بر خلاف سایر ویژگی‌های مورد بررسی، در کاربری‌های مختلف فاقد تفاوت معنی‌دار است. اما بین مقادیر TN،

مثال انتن و بی و اسن (Anteneh Wubie & Assen, 2020) در پژوهشی کمترین جرم مخصوص ظاهری خاک را در تمام کلاس‌های شیب جنگل ($1/26 - 1/23$) و بیشترین مقدار آن را در مرتع ($1/36 - 1/32$) گزارش کردند. این محققین افزایش جرم مخصوص ظاهری در مرتع را به چرای بی‌رویه دام نسبت دادند. حسین و همکاران (Husien *et al.*, 2015) نیز در پژوهشی در اتیوپی بیشترین مقادیر جرم مخصوص ظاهری را در اراضی کشاورزی گزارش نمودند. این محققین تجزیه مواد آلی خاک در اثر تبدیل کاربری طبیعی زمین به اراضی زراعی و کاهش تشکیل ساختمان را به عنوان عوامل مهم افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک برشمردند.

بیشترین میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه و درصد فضاهای درشت نیز، به ترتیب در خاک جنگل و مرتع و کمترین میزان آن‌ها در خاک شالیزار مشاهده شد. وجود فضاهای درشت‌تر در خاک جنگل و مرتع را می‌توان علاوه بر بافت خاک، به وجود خاکدانه‌های درشت‌تر (با توجه به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) و میزان بیشتر ماده آلی خاک نسبت داد. میانگین وزنی قطر خاکدانه در خاک جنگل $1/04$ میلی‌متر بود و در سایر کاربری‌ها کاهش یافته بطوری که در خاک شالیزار به $0/7$ میلی‌متر رسیده است. این نتیجه با نتایج خرمالی و همکاران (Khormali *et al.*, 2009) مطابقت دارد. این محققین میانگین وزنی قطر خاکدانه را در جنگلهای استان گلستان $1/94$ میلی‌متر و در مناطق جنگل‌تراشی شده $0/88$ میلی‌متر گزارش کردند (Khormali *et al.*, 2009). همانند سایر متغیرها بیشترین میانگین ذخیره کربن آلی خاک تا عمق 20 سانتی‌متری نیز، مربوط به خاک جنگل (224 t C ha^{-1}) و کمترین میزان آن مربوط به باغ مرکبات و اراضی زراعی ($18 - 20 \text{ t C ha}^{-1}$) بود. واحدی و همکاران (Vahedi *et al.*, 2014) در پژوهشی در جنگل گلندرود شمال ایران ذخیره کربن آلی خاک را 543 t C ha^{-1} برآورد نمودند.

OC، POC و MOC در کاربری‌های مختلف تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. بیشترین مقادیر این ویژگی‌ها در خاک جنگل و بعد از آن به ترتیب در مرتع، شالیزار، باغ مرکبات و اراضی زراعی وجود دارد. میزان کربن آلی در خاک جنگل ($83/2$ گرم بر کیلوگرم) حدود 12 تا 13 برابر میزان کربن آلی در اراضی زراعی و باغ مرکبات و حدود 6 برابر میزان کربن آلی خاک در شالیزار است. میزان ازت کل نیز در خاک جنگل $1/8 - 1/1$ برابر میزان ازت کل خاک در سایر کاربری‌ها است. مقدار زیاد ازت کل و کربن آلی خاک جنگل را می‌توان به وجود پوشش گیاهی مناسب در منطقه با توجه به بارندگی مناسب منطقه نسبت داد. خرمالی و همکاران (Khormali *et al.*, 2009) نیز میانگین کربن آلی خاک در جنگل‌های گلستان را $2/4$ درصد گزارش نمودند.

ماده آلی ذره‌ای به طور عمده در اندازه شن قرار دارد. مقدار زیاد POC در اراضی جنگلی معمولاً ناشی از ورود مواد آلی با اندازه بزرگ توسط درختان است که از نظر اندازه و از نظر ساختار شیمیایی با مواد آلی اراضی زراعی، باغ و مرتع متفاوت می‌باشد. به طور معمول، در خاک‌های تحت پوشش جنگل‌های دائمی با حجم زیادی از لاشبرگ ورودی به خاک، بیشترین مقدار کربن آلی در بخش ذره‌ای وجود دارد (Mendham *et al.*, 2004). از سوی دیگر در اراضی کشت شده و مراتع تخریب‌شده، مواد آلی درشت و ذره‌ای به واسطه تخریب خاکدانه‌ها اکسید و تجزیه می‌شوند.

جرم مخصوص ظاهری خاک نیز بطور معنی‌داری تحت تأثیر کاربری اراضی قرار گرفته است. بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری در خاک شالیزار ($1/75 \text{ g cm}^{-3}$) و کمترین مقدار در خاک جنگل ($1/23 \text{ g cm}^{-3}$) مشاهده شد. به نظر می‌رسد شکسته شدن خاکدانه‌ها در اثر عملیات کشاورزی، تجزیه و کاهش ماده آلی خاک و تراکم خاک از دلایل افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در شالیزار، باغ و اراضی زراعی می‌باشد. این نتیجه با یافته‌های بسیاری از محققین مطابقت دارد. به عنوان

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کاربری‌های مختلف.

Table 2. Mean values of soil physical and chemical properties in different land uses

	Farm lands	Paddy lands	Orchard lands	Range lands	Forest
WDC (%)	0.18a	0.19a	0.18a	0.14b	0.11b
TN (g kg ⁻¹)	1.9cd	1.7d	2.3bc	2.6ba	3.0a
OC (g kg ⁻¹)	6.9d	13.6c	6.1d	20.7b	83.2a
pH	7.2a	7.3a	7.2a	7.2a	6.7b
EC (dSm ⁻¹)	0.5a	0.5a	0.5a	0.3a	0.3a
CaCO ₃ (%)	18.57b	18.05b	21.97a	16.45b	16.53b
POC (g kg ⁻¹)	1.7c	3.2b	1.6c	3.4b	8.5a
MOC (g kg ⁻¹)	5.1d	10.3c	4.5d	17.3b	75a
Clay (%)	45.1a	40.2a	42.6a	22.5c	33.3b
Silt (%)	38.3ba	35.9ba	39.6a	32.5b	37.4ba
Sand (%)	16.6c	23.9bc	17.8c	45a	29.3b
OC _{pool} (ton ha ⁻¹)	20c	42b	18c	50b	224 a
pb (g cm ⁻³)	1.44b	1.57a	1.45b	1.34bc	1.23c
MWD (mm)	0.75c	0.70d	0.74cd	0.86b	1.04a
GMD (mm)	0.54b	0.51c	0.53bc	0.58a	0.61a
Mac (%)	53.62c	45.13d	54.32c	60.15b	63.19a
Mic (%)	46.38b	54.87a	45.68b	39.85c	36.81d

برخی علائم استفاده شده عبارتند از: WDC: رس قابل پراکنش، N: نیتروژن، OC: کربن آلی، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، CaCO₃: آهک، POC: کربن آلی ذره - ای، MOC: کربن آلی عجین شده با بخش معدنی، Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، OC_{pool}: ذخیره کربن آلی، pb: جرم مخصوص ظاهری، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه، Mac: درصد خاکدانه‌های درشت، Mic: درصد خاکدانه‌های ریز. در هر ردیف و برای هر عامل میانگین - هائی که حداقل دارای یک حرف مشترک هستند فاقد تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.

مجموعه حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک

بر اساس نتایج بدست آمده از تجزیه به مؤلفه اصلی، پنج مؤلفه اصلی دارای ارزش ویژه بیشتر از یک بودند و در مجموع ۷۵/۴ درصد از تغییرات بین متغیرها را توجیه نموده‌اند (جدول ۳). مؤلفه اول به تنهایی ۴۰/۶ درصد و بعد از آن مؤلفه دوم ۱۲/۹ درصد از واریانس کل را تبیین می‌کنند. در مؤلفه اصلی اول OC_{pool} بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و بعد از آن بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، متغیرهای MOC و OC بیشترین وزن را دارا بودند. در مرحله بعد به منظور یافتن متغیرهای همبسته در هر مؤلفه از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. بر اساس نتایج ضرایب همبستگی پیرسون، از میان متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با هم داشتند، متغیری که وزن بیشتری داشت، انتخاب شد و بقیه حذف گردیدند. بین OC_{pool} و OC ضریب همبستگی معنی دار (سطح یک درصد) برابر ۰/۹۹ بدست آمد (جدول ۴). بنابراین OC حذف شد. همچنین بین OC_{pool} و MOC ضریب همبستگی معنی دار (سطح

یک درصد) برابر ۰/۹۹ بدست آمد. بنابراین MOC نیز حذف شد. بدین ترتیب در مؤلفه اصلی اول فقط OC_{pool} برای درج در مجموعه داده‌های حداقل استفاده شد. در مؤلفه اصلی دوم درصد رس بیشترین وزن را داشت و به عنوان تنها متغیر در مجموعه داده‌های حداقل قرار گرفت. در مؤلفه اصلی سوم درصد خاکدانه‌های درشت دارای بیشترین وزن بود و بر اساس ۱۰ درصد وزن آن، درصد خاکدانه‌های ریز برای مجموعه داده‌های حداقل انتخاب شد ولی به دلیل داشتن ضریب همبستگی معنی دار (سطح یک درصد) برابر ۰/۹۹۰ بین این دو متغیر، در نهایت درصد خاکدانه‌های درشت در مجموعه داده‌های حداقل قرار گرفت. در مؤلفه اصلی چهارم EC در دسته داده‌های حداقل و در مؤلفه اصلی پنجم درصد سیلت در دسته داده‌های حداقل قرار گرفت (جدول ۳). مطالعات انجام شده در این زمینه نشان دهنده تفاوت در ویژگی‌های انتخاب شده به عنوان حداقل مجموعه ویژگی‌ها است. به عنوان مثال بهمنی و همکاران (Bahmani et

MDS در شالیزارهای مرکزی استان گیلان انتخاب کردند. یغمائیان مهابادی و همکاران (Yaghmaeian Mahabadi *et al.*, 2020) نیز شش ویژگی پتاسیم قابل جذب، کربن آلی، فسفر و روی قابل جذب، pH و تعداد نماد را برای مجموعه MDS در اراضی چای کاری غرب استان گیلان در نظر گرفتند.

(*al.*, 2019) ماده آلی، شن، منگنز، کربنات کلسیم معادل، روی و مس را به عنوان مجموعه MDS برای عمق صفر تا ۲۵ سانتی متری خاک در شهرستان بردسیر کرمان انتخاب کردند. همتی و همکاران (Hemmati *et al.*, 2019) پنج ویژگی کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم، درصد رس و فعالیت آنزیم اوره آز را به عنوان مجموعه

جدول ۳- نتایج تجزیه به مولفه‌های اصلی برای ویژگی‌های خاک

Table 3. Results of PCA for soil properties

PCs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	Communalities
Eigen value	7.31	2.32	1.49	1.28	1.17	
Percent	0.406	0.129	0.083	0.071	0.065	
Cumulative percent	0.406	0.535	0.618	0.689	0.754	
Eigen vectors						
WDC	0.349	-0.047	-0.286	-0.612	0.216	0.627
MOC	0.901	0.157	0.187	0.229	0.039	0.926
POC	0.775	0.127	0.196	0.068	-0.142	0.68
NT	0.502	0.014	0.534	-0.127	-0.132	0.571
OC	0.906	0.163	0.203	0.226	0.034	0.941
pH	-0.411	0.072	-0.124	-0.495	-0.316	0.534
EC	-0.077	-0.177	-0.064	<u>-0.871</u>	0.067	0.805
CaCO ₃	-0.343	-0.313	0.401	-0.121	-0.069	0.395
Clay	-0.153	<u>-0.913</u>	-0.014	0.039	0.114	0.871
Silt	-0.032	0.027	-0.093	-0.087	<u>0.934</u>	0.890
Sand	0.136	0.701	0.061	0.028	-0.656	0.944
Porosity	0.236	0.616	0.041	0.255	-0.087	0.459
OC _{pool}	<u>0.923</u>	0.079	0.207	0.203	0.011	0.934
ρb	0.056	-0.814	-0.256	-0.052	-0.222	0.783
MWD	0.718	0.15	0.511	0.098	-0.127	0.826
GMD	0.401	0.29	0.555	0.141	-0.086	0.58
Mac	0.346	0.134	<u>0.823</u>	0.258	0.004	0.881
Mic	-0.346	-0.133	-0.82	-0.26	-0.004	0.877

^a . اعداد پررنگ به عنوان بیشترین وزن در نظر گرفته شدند. ^b . اعداد پررنگ که زیر آنها خط کشیده شده است، به عنوان MDS انتخاب شدند

جدول ۴- ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌های با بیشترین وزن برای پنج مؤلفه اول

Table 4. Correlation coefficients for the highly weighted variables under the first five PCs.

	Mic	OC	MOC
Mac	0.99**	-0.56**	0.55**
OC _{pool}	-0.57**	-0.99**	0.99**

** و * به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ و ۰/۰۵ را نشان می‌دهد.

** and * Significant at 99% and 95% confidence level, respectively.

وزن دهی ویژگی‌ها

در مرحله بعد واریانس مشترک یا سهم هر ویژگی توسط روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در دو مجموعه کل ویژگی‌های موثر بر خاک (TDS) و حداقل ویژگی‌های موثر بر خاک (MDS) محاسبه و با تعیین نسبت واریانس مشترک هر ویژگی به مجموع واریانس مشترک کل ویژگی‌ها، وزن (W_i) هر ویژگی محاسبه گردید (جدول ۵). میزان تأثیرگذاری هر ویژگی در شاخص‌های کیفیت خاک، به وزن اختصاص یافته به آن ویژگی بستگی دارد. بنابراین ویژگی دارای وزن بیشتر در هر مجموعه TDS یا MDS، دارای تأثیر بیشتر بر شاخص کیفیت خاک بوده و با کاهش وزن آن، این تأثیر کمتر

می‌شود (Goevaerts *et al.*, 2006). در مجموعه MDS، درصد خاکدانه‌های درشت و OC_{pool} بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۵). ذخایر کربن آلی خاک با اثر بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، چرخه عناصر غذایی، فعالیت‌های میکروبی، آب قابل استفاده خاک، شدت جریان گازها و ... را تحت تأثیر قرار داده و به همین دلیل می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای بر پایداری کیفیت خاک داشته باشد (Rodriguez-Loainaz *et al.*, 2008). در مجموعه TDS، تخلخل بیشترین وزن را به خود اختصاص داد (جدول ۴).

جدول ۵- واریانس مشترک و وزن ویژگی‌های خاک در مجموع کل داده‌ها و دسته داده‌های حداقل
Table 5. Commuality and weight values of soil properties in the TDS and MDS.

Parameters	TDS		MDS	
	Commuality	Weight	Commuality	Weight
WDC	0.637	0.046		
MOM	0.926	0.068		
POC	0.68	0.05		
N	0.571	0.04		
OC	0.941	0.069		
pH	0.534	0.039		
EC	0.805	0.059	0.352	0.187
CaCO ₃	0.395	0.029		
Clay	0.871	0.064	0.185	0.096
Silt	0.89	0.065	0.031	0.016
Sand	0.944	0.069		
Porosity	0.495	0.364		
OC_{pool}	0.943	0.069	0.651	0.346
pb	0.873	0.057		
MWD	0.826	0.06		
GMD	0.58	0.042		
Mac	0.881	0.064	0.663	0.353
Mic	0.877	0.064		

معنی‌داری بیشتر از سایر کاربری‌ها بود. از طرف دیگر مقایسه میانگین شاخص‌های مختلف کیفیت خاک نشان داد که بیشترین مقدار شاخص در تمام کاربری‌ها مربوط به شاخص کیفیت وزن دهی شده خاک با نمره دهی خطی برای مجموع کل ویژگی‌ها ($SQI_{w-TDS-L}$) است. بعد از آن

در ادامه شاخص کیفیت خاک تجمعی و شاخص کیفیت خاک وزن دار در همه کاربری‌ها و کلاس‌های شیب تعیین گردید (جدول ۶). مقادیر SQI_a و SQI_w به هر دو روش نمره دهی خطی و غیرخطی و برای مجموع کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها در کاربری جنگل بطور

روش‌ها دارای درجه III، باغ مرکبات و شالیزار دارای درجه IV و اراضی زراعی دارای درجات III و IV بودند. همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقادیر TN، OC، POC، MOC و MWD بعد از خاک جنگل و مرتع، در خاک‌های شالیزار، اراضی زراعی و باغ کاهش معنی‌داری دارد، لذا این کاربری‌ها، درجات کمتری از کیفیت خاک را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج پژوهش نبی‌اللهی و همکاران (Nabiollahi *et al.*, 2018) در استان کردستان نشان دادند که کیفیت خاک ارزیابی شده به روش TDS و MDS در منطقه مطالعاتی، عمدتاً دارای درجه III بوده و تنها در بخش کوچکی درجه I دارد.

شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه حداقل ویژگی‌ها ($SOI_{a-MDS-NL}$) بیشترین مقدار را در تمام کاربری‌ها به خود اختصاص داده است (جدول ۶). مقایسه مقادیر بدست‌آمده برای کیفیت خاک در تمام روش‌ها با طبقه‌بندی درجات کیفیت خاک (جدول ۷) نشان داد که در تمام روش‌های ارزیابی، کیفیت خاک جنگل درجه I دارد و بسیار خوب است که علت آن را می‌توان به مقادیر زیاد TN، OC، POC، MOC و MWD در خاک جنگل نسبت داد (جدول ۲). اما کیفیت خاک مرتع، باغ مرکبات، شالیزار و اراضی زراعی در روش‌های مختلف ارزیابی، درجات مختلفی را به خود اختصاص داد (جدول ۶). کیفیت خاک مرتع در بیشتر

جدول ۶- مقایسه میانگین شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت وزن‌دار در پنج کاربری اراضی با استفاده از توابع امتیازدهی خطی و غیرخطی

Table 5. Mean values of SQI_a and SQI_w models in five land uses, using linear and non-linear scoring functions

Index	Farmlands		Paddy fields		Orchard land		Rangelands		Forest	
	Mean	SQC	Mean	SQC	Mean	SQC	Mean	SQC	Mean	SQC
$SOI_{a-TDS-L}$	0.43 ^{cC}	IV	0.37 ^{dD}	V	0.43 ^{cC}	IV	0.49 ^{bC}	III	0.63 ^{aC}	I
$SQI_{w-TDS-L}$	0.71 ^{bA}	III	0.65 ^{bA}	III	0.67 ^{bA}	III	0.86 ^{aA}	II	0.90 ^{aA}	I
$SOI_{a-TDS-NL}$	0.47 ^{bC}	III	0.46 ^{bC}	IV	0.44 ^{bC}	IV	0.51 ^{bC}	III	0.64 ^{aC}	I
$SQI_{w-TDS-NL}$	0.42 ^{bC}	III	0.45 ^{bC}	IV	0.43 ^{bC}	IV	0.51 ^{bC}	III	0.66 ^{aC}	I
$SOI_{a-MDS-L}$	0.47 ^{bC}	IV	0.43 ^{bC}	IV	0.46 ^{bC}	IV	0.51 ^{bC}	III	0.66 ^{aC}	I
$SQI_{w-MDS-L}$	0.42 ^{bC}	III	0.36 ^{cD}	IV	0.41 ^{bC}	III	0.46 ^{bC}	III	0.74 ^{aB}	I
$SOI_{a-MDS-NL}$	0.53 ^{bB}	II	0.54 ^{bB}	II	0.49 ^{bB}	III	0.58 ^{bB}	II	0.73 ^{aBC}	I
$SQI_{w-MDS-NL}$	0.44 ^{cC}	IV	0.46 ^{cC}	IV	0.43 ^{cC}	IV	0.55 ^{bBC}	III	0.78 ^{aB}	I

$SOI_{a-TDS-L}$: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموع کل داده‌ها، $SQI_{w-TDS-L}$: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموع کل داده‌ها، $SOI_{a-TDS-NL}$: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموع کل داده‌ها، $SQI_{w-TDS-NL}$: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموع کل داده‌ها، $SOI_{a-MDS-L}$: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه حداقل داده‌ها، $SQI_{w-MDS-L}$: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه حداقل داده‌ها، $SOI_{a-MDS-NL}$: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه حداقل داده‌ها، $SQI_{w-MDS-NL}$: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه حداقل داده‌ها. حروف مشابه (حروف کوچک برای هر ردیف و حروف بزرگ برای هر ستون) نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح اطمینان ۵ درصد آزمون LSD است. SQC: کلاس کیفیت خاک

$SOI_{a-TDS-L}$: Additive Soil Quality Index with linear scoring function method for total data set, $SQI_{w-TDS-L}$: Weighted Additive Soil Quality Index with linear scoring function method for total data set, $SOI_{a-TDS-NL}$: Additive Soil Quality Index with non-linear scoring function method for total data set, $SQI_{w-TDS-NL}$: Weighted Additive Soil Quality Index with non-linear scoring function method for total data set, $SOI_{a-MDS-L}$: Additive Soil Quality Index with linear scoring function method for minimum data set, $SQI_{w-MDS-L}$: Weighted Additive Soil Quality Index with linear scoring function method for minimum data set, $SOI_{a-MDS-NL}$: Additive Soil Quality Index with non-linear scoring function method for minimum data set, $SQI_{w-MDS-NL}$: Weighted Additive Soil Quality Index with non-linear scoring function method for minimum data set.

The same letters (lowercase letters for each row and uppercase letters for each column) indicate the absence of a significant difference at the 5% confidence level of the LSD test. SQC: Soil quality Class

جدول ۷- طبقه‌بندی درجات کیفیت خاک بر اساس SQI_s (Nabiollahi et al, 2018)

Table.6. Classification of Soil quality grades according to SQI_s (Nabiollahi et al, 2018)

Index	Soil quality classes				
	I (Very good)	II (Good)	III (Medium)	IV (Poor)	V (Very poor)
SOI _a -TDS-L	>0.63	0.55-0.63	0.47-0.55	0.39-0.47	<0.39
SQI _w -TDS-L	>0.87	0.74-0.87	0.61-0.74	0.49-0.61	<0.49
SOI _a -TDS-NL	>0.62	0.54-0.62	0.47-0.54	0.39-0.47	<0.39
SQI _w -TDS-NL	>0.63	0.54-0.63	0.46-0.54	0.37-0.46	<0.37
SOI _a -MDS-L	>0.72	0.61-0.72	0.5-0.61	0.4-0.5	<0.4
SQI _w -MDS-L	>0.74	0.56-0.74	0.37-0.56	0.19-0.37	<0.19
SOI _a -MDS-NL	>0.64	0.48-0.64	0.32-0.48	0.16-0.32	<0.16
SQI _w -MDS-NL	>0.71	0.6-0.71	0.48-0.6	0.37-0.48	<0.37

بدترین کیفیت خاک نیز در شالیزار مشاهده می‌شود و در شیب‌های مختلف، شاخص کیفیت خاک فاقد تفاوت معنی‌دار است (جدول ۸). لازم به توضیح است که شاخص SOI_a-MDS-NL، بهترین درجه کیفیت خاک را در کاربری‌های مختلف نشان داد اما نتوانست تفاوت معنی‌دار زیادی بین کاربری‌ها و سطوح مختلف شیب را تشخیص دهد (جدول ۸).

نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت تجمعی خاک در پنج کاربری و پنج کلاس شیب در جدول ۸ ارائه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، شاخص‌های مختلف، درجات متفاوتی از کیفیت خاک را در هر کاربری و کلاس شیب نشان دادند. بر اساس شاخص SOI_a، بهترین کیفیت خاک مربوط به شیب ۵-۲ و ۲ و ۸-۵ درصد جنگل است. بعد از آن شیب‌های ۲-۰، ۸-۱۲ و بزرگتر از ۱۲ جنگل کیفیت خاک بهتری دارند.

جدول ۸- مقایسه میانگین شاخص کیفیت تجمعی در پنج کاربری و پنج کلاس شیب با استفاده از توابع امتیازدهی خطی و غیرخطی.

Table 8. Mean values of SQI_a models in five land uses and five slope classes, using linear and non-linear scoring functions

Land use	Slope (%)	SQI _a							
		TDS				MDS			
		linear	SQC	Non linear	SQC	linear	SQC	Non linear	SQC
Farm lands	0-2	0.45d	IV	0.48c	III	0.54de	III	0.56cde	II
	2-5	0.43de	IV	0.48c	III	0.50de	IV	0.54def	II
	5-8	0.42e	IV	0.45d	IV	0.48de	IV	0.51def	II
	8-12	0.42e	IV	0.45c	IV	0.43ef	IV	0.48ef	II
	>12	0.41e	IV	0.45c	IV	0.36h	V	0.46f	III
Paddy fields	0-2	0.37ef	V	0.46c	IV	0.47de	IV	0.58cde	II
	2-5	0.35ef	V	0.43d	IV	0.39g	V	0.53def	II
	5-8	0.38ef	V	0.46c	IV	0.40fg	IV	0.53def	II
	8-12	0.37ef	V	0.46c	IV	0.45ef	IV	0.51def	II
	>12	0.34f	V	0.44c	IV	0.40fg	IV	0.51def	II
Orchard land	0-2	0.45d	IV	0.48c	III	0.45ef	IV	0.53def	II
	2-5	0.45de	IV	0.46c	IV	0.44ef	IV	0.51ef	II
	5-8	0.43e	IV	0.44c	IV	0.45ef	IV	0.53def	II
	8-12	0.43e	IV	0.46c	IV	0.42fg	IV	0.50ef	II
	>12	0.41ef	IV	0.46c	IV	0.42fg	IV	0.50ef	II
Rangelands	0-2	0.48cd	III	0.61ab	II	0.55cd	III	0.69abc	I
	2-5	0.50cd	III	0.55bc	II	0.55cd	III	0.68abc	I
	5-8	0.49cd	III	0.54bc	II	0.54cd	III	0.59bcd	II
	8-12	0.48cd	III	0.50c	III	0.49de	IV	0.63bc	II
	>12	0.46d	IV	0.42d	IV	0.49de	IV	0.58bcd	II

Forest	0-2	0.60abc	II	0.64ab	I	0.71ab	II	0.74a	I
	2-5	0.65a	I	0.66a	I	0.75a	I	0.76a	I
	5-8	0.64a	I	0.63ab	I	0.62bc	II	0.70ab	I
	8-12	0.62ab	II	0.62ab	II	0.62bc	II	0.73a	I
	>12	0.56bc	II	0.62ab	II	0.58cd	III	0.71ab	I

SQC: Soil quality classes

معنی‌دار هستند (جدول ۹). در همین زمینه نتایج پژوهش کاکه و همکاران (Kakeh *et al.*, 2017) در بخشی از اراضی جنوب شرق قزوین نشان داد که کاربری باغ و مرتع بیشترین مقدار شاخص کیفیت تجمعی و شاخص کیفیت نمو را در هر دو مجموعه ویژگی به خود اختصاص داده است و بعد از آن کاربری‌های زراعت آبی، زراعت دیم و اراضی رهاشده دارای کمترین کیفیت خاک هستند. همچنین با افزایش درصد شیب، شاخص کیفیت تجمعی و نمو کاهش یافته است.

در جدول ۹ نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت وزن‌دار خاک در پنج کاربری و پنج کلاس شیب ارائه شده است. بر اساس شاخص SQI_w ، بهترین کیفیت خاک مربوط به کلاس‌های شیب ۰-۲ و ۵-۲ درصد جنگل است. بعد از آن شیب‌های ۵-۸، ۸-۱۲ و بزرگتر از ۱۲ جنگل کیفیت خاک بهتری دارند. کلاس‌های شیب ۰-۲ و ۵-۲ درصد مرتع نیز دارای درجه I و II هستند. درجه کیفیت خاک شالیزار، اراضی زراعی و باغ مرکبات III و IV است و در سطوح مختلف شیب عمدتاً فاقد تفاوت

جدول ۹- مقایسه میانگین شاخص کیفیت وزن‌دار در پنج کاربری و پنج کلاس شیب با استفاده از توابع امتیازدهی خطی و غیرخطی
Table 9. Mean values of SQI_w models in five land uses and five slope classes, using linear and non-linear scoring functions

Land use	Slope (%)	SQI_w							
		TDS				MDS			
		linear	SQC	Non linear	SQC	linear	SQC	Non linear	SQC
Farm lands	0-2	071d	III	0.47d	III	0.50de	III	0.46de	IV
	2-5	0.74c	III	0.49d	III	0.47de	III	0.47de	IV
	5-8	0.68d	III	0.46d	III	0.43de	III	0.45de	IV
	8-12	0.62d	III	0.44d	IV	0.38ef	III	0.42e	IV
	>12	0.65d	III	0.44d	IV	0.33fg	IV	0.41e	IV
Paddy fields	0-2	0.66d	III	0.47d	III	0.42de	III	0.53cde	III
	2-5	0.66d	III	0.45d	IV	0.37ef	IV	0.46de	IV
	5-8	0.64d	III	0.45d	IV	0.38ef	III	0.48de	IV
	8-12	0.57e	IV	0.46d	IV	0.32fg	IV	0.41e	IV
	>12	0.53e	IV	0.43d	IV	0.30g	IV	0.41e	IV
Orchard land	0-2	0.71c	III	0.47d	III	0.47de	III	0.46e	IV
	2-5	0.70d	III	0.47d	III	0.45de	III	0.46de	IV
	5-8	0.65d	III	0.45d	IV	0.41ef	III	0.43de	IV
	8-12	0.61e	IV	0.44d	IV	0.37ef	III	0.41e	IV
	>12	0.68c	III	0.45d	IV	0.37ef	IV	0.41e	IV
Rangelands	0-2	0.99a	I	0.62ab	II	0.51cd	III	0.67bc	II
	2-5	0.91ab	I	0.54bc	II	0.50cd	III	0.61bcd	II
	5-8	0.85b	II	0.51bc	III	0.53cd	III	0.56cde	III
	8-12	0.84b	II	0.48c	III	0.53cd	III	0.46de	IV
	>12	0.69c	III	0.40e	IV	0.48cd	III	0.48de	IV
Forest	0-2	0.99a	I	0.67a	I	0.87a	I	0.82a	I
	2-5	0.91ab	I	0.68a	I	0.84ab	I	0.81a	I
	5-8	0.82b	II	0.65ab	I	0.72b	II	0.77ab	I
	8-12	0.82b	II	0.62b	II	0.62bc	II	0.76ab	I
	>12	0.87ab	II	0.62b	II	0.64bc	II	0.76ab	I

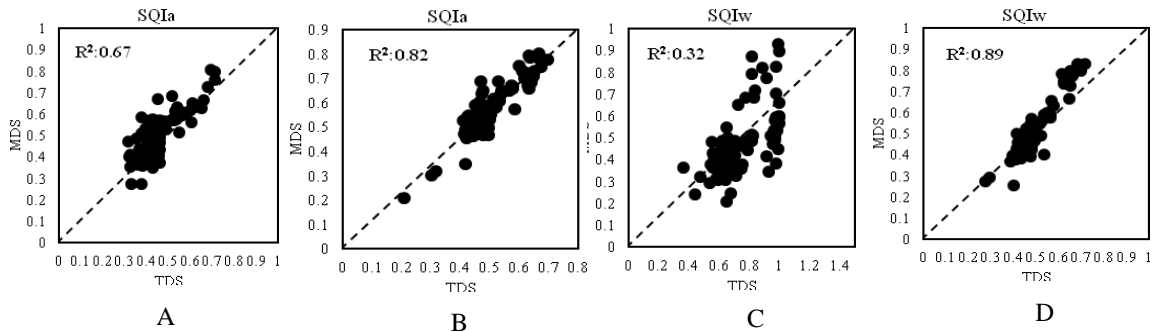
SQC: Soil quality classes

(شکل ۲). همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، ضریب تبیین رابطه بین دو مجموعه MDS و TDS در

در ادامه ضریب تبیین بین TDS و MDS، به منظور بررسی امکان استفاده از MDS بجای TDS، محاسبه شد

روش غیرخطی استفاده نمود و یکی از شاخص‌های SOI_a -MDS-NL و SOI_w -MDS-NL را برای ارزیابی کیفیت خاک بکار برد. کاکه و همکاران (Kakeh *et al.*, 2017) نیز ضریب تبیین بین دو مجموعه MDS و TDS برای شاخص کیفیت تجمعی و کیفیت نمرو را به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۹ بدست آوردند.

SOI_w و SOI_a برای روش خطی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۳۲ است. اما در روش غیرخطی این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۸۹ است که بیانگر مشابهت برآورد حاصل از مجموعه ویژگی‌های حداقل با برآورد حاصل از مجموعه کل ویژگی‌ها است. بنابراین می‌توان به جای اندازه‌گیری مجموعه TDS در منطقه مطالعاتی، از مجموعه MDS به



شکل ۲- رابطه خطی بین مجموعه کل ویژگی‌ها و ویژگی‌های حداقل برای شاخص‌های کیفیت تجمعی و کیفیت وزن‌دار با استفاده از روش‌های امتیازدهی خطی (A و C) و غیرخطی (B و D).

Figure 2. Linear relationships between TDS and MDS for SOI_a and SOI_w using linear (A and C) and non-linear (B and D) scoring methods.

که وضعیت کیفیت خاک می‌تواند منعکس‌کننده میزان ذخیره کربن آلی در خاک باشد. بیشترین ضریب همبستگی پیرسون با OC_{pool} ، مربوط به SOI_w -MDS-NL است. بنابراین شاخص کیفیت SOI_w -MDS-NL برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه مطالعاتی پیشنهاد می‌گردد.

در ادامه برای اعتبارسنجی مدل‌ها و تعیین بهترین مدل، ضرائب همبستگی پیرسون بین مقادیر ذخیره کربن آلی با هشت شاخص کیفیت خاک محاسبه شد (جدول ۱۰). همان‌گونه که در جدول ۱۰ مشاهده می‌گردد همه شاخص‌های کیفیت خاک، همبستگی بالایی با OC_{pool} در سطح احتمال یک درصد دارند. این نتیجه نشان می‌دهد

جدول ۱۰- ضرائب همبستگی پیرسون بین مقادیر ذخیره کربن آلی و شاخص‌های کیفیت خاک

Table 10. Pearson correlation between OC_{pool} and soil quality indices.

SOI_w -TDS-NL	SOI_a -TDS-NL	SOI_w -TDS-L	SOI_a -TDS-L	SOI_w -MDS-NL	SOI_a -MDS-NL	SOI_w -MDS-L	SOI_a -MDS-L	
0.81**	0.80**	0.54**	0.83**	0.85**	0.77**	0.78**	0.69**	OC_{pool}

SOI_a -MDS-L: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه حداقل داه‌ها، SOI_w -MDS-L: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه حداقل داه‌ها، SOI_a -MDS-NL: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه حداقل داه‌ها، SOI_w -MDS-NL: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه حداقل داه‌ها، SOI_a -TDS-L: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه کل داه‌ها، SOI_w -TDS-L: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی خطی برای مجموعه کل داه‌ها، SOI_a -TDS-NL: شاخص کیفیت تجمعی خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه کل داه‌ها، SOI_w -TDS-NL: شاخص کیفیت وزن‌دار خاک با نمره‌دهی غیرخطی برای مجموعه کل داه‌ها. همبستگی‌هایی که دو ستاره دریافت نموده‌اند در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشند.

شاخص‌های کیفیت تجمعی و کیفیت وزن‌دار را می‌باشند. بعد از آن به ترتیب مرتع، اراضی زراعی، باغ مرکبات و در نهایت شالیزار کمترین کیفیت خاک را به

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که شیب‌های ۲-۵، ۰-۲ و ۵-۸ درصد جنگل بهترین کیفیت خاک را بر اساس

خوب بین این دو مجموعه برای هر دو شاخص بود. بنابراین می‌توان با استفاده از شاخص‌های کیفیت خاک حاصل از مجموعه MDS به روش امتیازدهی غیرخطی، علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه، با اطمینان قابل قبولی کیفیت خاک را ارزیابی نمود. همچنین بر اساس نتایج ضریب همبستگی پیرسون، شاخص $SQI_{w-MDS-NL}$ بیشترین همبستگی را با ذخیره کربن آلی خاک نشان داد. از این‌رو استفاده از این شاخص برای ارزیابی کیفیت خاک منطقه پیشنهاد می‌گردد.

خود اختصاص داده‌اند. در بین شاخص‌های اندازه‌گیری شده، شاخص $SOI_{a-MDS-NL}$ بهترین درجه کیفیت خاک را به تمام کاربری‌ها و سطوح مختلف شیب، در مقایسه با سایر شاخص‌ها، اختصاص داد. شاخص $SQI_{w-TDS-NL}$ نیز از کارایی بیشتری برای نشان دادن اثر درصد شیب بر کیفیت خاک برخوردار بود و نشان داد که با افزایش درجه شیب، کیفیت خاک کاهش می‌یابد. از سوی دیگر ضرایب تبیین بدست‌آمده بین دو مجموعه MDS و TDS برای شاخص‌های کیفیت تجمعی و کیفیت وزن‌دار با استفاده از روش امتیازدهی غیرخطی، نشان‌دهنده رابطه

References

- Alidoust E., Afyuni M., Hajabbasi M.A., and Mosaddeghi M.R. 2018. Application of multivariate statistical methods for evaluating soil quality indices in Lordegan semiarid region. *Applied Soil Research*, 7(3): 192-206. (In Persian)
- Andrews S.S., Karlen D.L., and Cambardella C.A. 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of American Journal*, 68: 1945-1962.
- Andrews S.S., Karlen D.L., and Mitchell J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90 (1): 25-45.
- Anteneh Wubie M., and Assen M. 2020. Effects of land cover changes and slope gradient on soil quality in the Gumara watershed, lake Tana basin of north-west Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6: 85-97.
- Askari M.S., and Holden N.M. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150: 57-67.
- Bahmani M., Mohammadi J., Esfandiarpour Boroujeni I., and Motaghian H.R. 2019. Assessing and mapping of Integrated and nemero soil quality indices and their relationship with rose yield (a case study: Bardsir, Kerman province). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(3): 1-23. (In Persian)
- Baker B.J., Fausey N.R., and Islam K.R. 2004. Comparison of soil physical properties under two different water table management regimes. *Soil Science Society of American Journal*, 68: 1973-1981.
- Bastida F., Moreno J.L., Hernandez T., and García C. 2006. Microbiological degradation index of soils in a semiarid climate. *Soil Biology and Biochemistry*, 38: 3463-3473.
- Blake G.R., Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis- Part 1. Physical Methods—SSSA Book Series No. 9. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 363-375.
- Bremner J.M., Mulvaney C.S. 1982. Total nitrogen. In: Page A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis - Part 2. Chemical and Microbiological Properties—SSSA Book Series No. 9. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 595-624.
- Cambardella C.A., Elliott E.T. 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. In: Brussaard L., Kooistra M.J. (Eds.), *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships*. Elsevier, Wageningen, Netherlands, pp. 449-457.
- Cambardella C.A., Gajda A.M., Doran J.W., Wienhold B.J., Kettler T.A. 2001. Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on ignition., In: Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (Eds.), *Assessment Methods for Soil Carbon*. CRC, Boca Raton, FL, pp: 349-359.
- Compos C.A., Oleschko L.K., Elchevers B.J., and Hidalgo M.C. 2007. Exploring the effect of change in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 248: 174-182.
- Doran J.W., and Jones A.J. 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. 2nd Ed. Soil Science Society of America Special Publication, Madison, WI, 401p.

- Doran J.W., and Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Eds.). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*, Special Publication, Madison, WI, pp. 1-21.
- Gee W., Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis-Part 1. Physical Methods—SSSA Book Series No. 9. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp. 383-411.
- Ghaemi M., Astaraei A.R., Sanaei Nezhad S.H., Nasiri Mahalati M., and Emami H. 2013. Evaluating chemical quality of several soil cultivation wheat-corn using of soil quality models at some parts of south east Mashhad area. *Soil Research*, 27(4): 463-473. (In Persian)
- Griffiths B.S., Ball B.C., Daniell T.J., Hallett P.D., Neilson R., Wheatley R.E., and Bohanec M. 2010. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. *Applied Soil Ecology*, 46(1): 43–53.
- Guo L.B., and Gifford R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change. *Global Change Biology*, 8: 345–360.
- Guo L., Sun Z., Ouyang Z., Han D., and Li F. 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for fluvisol along the lower yellow river. *Catena*, 152: 135-143.
- Govaerts B., Sayre K.D., and Deckers J. 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.
- Hemati fard A., Nadri M., Karimi A., and Mohammadi J. 2018. Assessment quantitative of soil quality in different uses of shahrekord plain using the analytical hierarchical process (AHP). *Journal of Water and Soil Science*, 23(1): 293- 307.
- Hemmati S., Yaghmaeian Mahabadi N., Farhangi M.B. and Sabouri A. 2019. Assessing soil quality indices and their relationships with rice yield in paddy fields of central Guilan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(1): 1-24.
- Husien H., Mohamed A., Melanie D. 2015. Impacts of land use and land cover changes and topographic aspects on soil quality in the Kasso catchment, bale mountains of the south eastern Ethiopia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 36: 357– 375.
- Hussain I., Olson K.R., Wander M.M., and Karlen D.L. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Tillage Research*, 50: 237–249.
- Kakeh J., Gorji M., and Alimohammadi A. 2017. Quantitative soil quality assessment in different land uses at some parts of south eastern of Qazvin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4): 775-784. (In Persian)
- Karami O., Nasr M.H., Jalilvand H., and Miryaghubzadeh M. 2015. Determination of Babolrood basin capability for various land uses using multi criteria decision making methods. *Journal of Watershed Management Research*, 6 (11): 171- 181. (In Persian)
- Karlen D.L., Scott D.E., 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*, Madison, WI, USA, pp. 53–72.
- Khormali F., Ajami M., Ayoubi S., Srinivasarao C., and Wani S.P. 2009. Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134: 178–189.
- Liebig M.A., Varvel G., and Doran J. 2001. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. *Agronomy Journal*, 93: 313–318.
- Masto R., Chhonkar P., Singh D., and Patra A. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi- arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1–3): 419–435.
- Marquez C.O., Garcia V.J., Cambardella C.A., Schultz R.C. and Isenhardt T.M. 2004. Aggregate-size stability distribution and soil stability. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 725-735.
- Marzaioli R., D’Ascoli R., De Pascale R.A., and Rutigliano F.A. 2010. Soil quality in a mediterranean area of southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 44: 205–212.

- Mendham D.S., Heagney E.C., and Corbeels M. 2004. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. *Soil Biology and Biochemistry*, 36: 1067-1074.
- Mirkhani R., Vaezi A.R., and Rezaei H. 2020. Spatial distribution of soil quality in Savojbolagh fields in Alborz province. *Applied Soil Research*, 9(2): 1-19. (In Persian)
- Mukherjee A., and Lal R. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. *Plos One*, 9 (8): 59-81.
- Nabiollahi K., Golmohamadi F., Taghizadeh-Mehrjardi R., Kerry R., and Davari M. 2018. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318: 16-28.
- Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W., and Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3-4): 325-334.
- Rengasamy P., Greene R.S.B., Ford G.W., and Mehanni A.H. 1984. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. *Australian Journal of Soil Research*, 22: 413-431.
- Rodriguez-Loainaz G., Onaindia M., Amezaga I., Mijangos I., and Garbisu C. 2008. Relationship between vegetation diversity and soil functional diversity in native mixed-oak forests. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 49-60.
- Safaei M., Bashari H., Mosaddeghi M.R., and Jafari R. 2019. Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *Catena*, 177: 260-271.
- Shahab H., Emami H., Hagh Nia G.H., and Karimi A. 2011. Determining most important properties for soil quality indices of agriculture and rangelands in some parts of southern Mashhad. *Journal of Water and Soil*, 25(5): 1197-1205. (In Persian)
- Soofi M.B., Emami H., Karimi Karoyeh A.R., and Hagh Nia G.H. 2016. Investigation the effects of aspect and degree of slope on soil quality in the south east of Mashhad. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2): 301- 310. (In Persian)
- Vahedi A.A., Mataji A., and Hojati M. 2014. Modelling of soil organic carbon in relation to soil physico-chemical properties in Glendrood forest in northern Iran. *Journal of soil research (soil and water sciences)*, 28(1): 53-62. (In Persian)
- Varasteh Khanlari Z., Golchin A., and Musavi Kupar S.A. 2020. Effect of land use change and land reclamation on some qualitative characteristics and activity of some enzymes in the soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(4):1055-1068. (In Persian)
- Vasu D., Singh S.K., Ray S.K., Duraisami V.P., Tiwary P., Chandran P., Nimkar A.M., and Anantwar S.G. 2016. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282: 70-79.
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63: 251-263.
- Yaghmaeian Mahabadi N., Fayyaz H., Sabouri A., and Shirinfekr A. 2021. Comparison of soil quality evaluation methods and their relationships with tea yield in west Guilan province. *Journal of Soil Research*, 34(4): 435-451.
- Yuan J.Z., and Mingan S. 2008. Spatial distribution of surface rock fragment on hill slopes in a small catchment in wind-water erosion crisscross region of the loess Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51: 862-870.
- Zeraatpisheh M., Bakhshandeh E., Hosseini M., and Alavi S.M. 2020. Assessing the effects of deforestation and intensive agriculture on the soil quality through digital soil mapping. *Geoderma*, 363: 114-139.

Quantitative Assessment of Soil Quality in Different Land Uses and Slope Gradients at Babolrood Watershed, South of Mazandaran Province

Fatemeh Aghalari¹, Elham Chavoshi^{2*}, Sattar Chavoshi Borujeni³, Naser Honarjoo⁴, Ahmad Jalalian⁵

(Received: November, 2021

Accepted: October, 2022)

Abstract

Soil quality is affected by land use and slope gradient, and soil quality assessment is important in determining sustainable land-use and soil-management practices. This study was conducted to assess soil quality in different land uses and slope gradients at Babolrood watershed, south of Mazandaran province. The studied factors included five levels of land uses (natural forest, rangeland, paddy field, citrus orchard and farmlands) and five levels of slope classes (0-2%, 2-5%, 5-8%, 8-12% and above 12 %). A total of 89 soil samples were collected in the upper layer of topsoil (depth 0-20 cm). The seventeen soil properties were used in a total data set (TDS). These properties included pH, EC, organic carbon (OC), clay, silt, sand, water dispersible clay (WDC), soil bulk density (BD), soil porosity (Pr), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), macro aggregates, micro aggregates, total neutralizing value (TNV), organic carbon pool (OC_{pool}), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated organic carbon (MOC). Using the principal components analysis (PCA) method, five soil properties (OC_{pool}, macro aggregates, EC, silt and clay) were selected for the minimum data set (MDS). The soil quality was evaluated by additive soil quality index (SQI_a) and weighted additive soil quality index (SQI_w) in two data sets of soil properties including MDS and TDS. The eight soil quality indices showed that the forest has the best soil quality with a good and very good grade and the paddy field has the poorest soil quality. Also, among the evaluated SQI_s, only SQI_{w-TDS-NL} showed a decrease in soil quality with increasing slope gradients. Moreover, the correlation coefficients were 82% and 89% between the two sets of MDS and TDS in SQI_a and SQI_w using nonlinear scoring methods, respectively. Because of the good correlation between TDS and MDS, the MDS set is better to determine soil quality indices in the study area. The correlation coefficient between SQI_{w-MDS-NL} with OC_{pool} was higher (0.85) than all SQI_s. So, SQI_{w-MDS-NL} is suggested to evaluate soil quality in the study area.

Keywords: Weighted additive soil quality, Additive soil quality, Minimum data set, Principal components analysis

Aghalari F., Chavoshi E., Chavoshi Borujeni S., Honarjoo N. Jalalian A. 2023. Quantitative assessment of soil quality in different land uses and slope gradients at Babolrood watershed, south of Mazandaran province. *Applied Soil Research*, 11(2): 95-112.

1. Ph.D. Student of Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

3. Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Centre, AREEO, Isfahan, Iran

4. Associate Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

5. Full Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

* Corresponding Author Email: chavoshie@yahoo.com