ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ در باغ‌های پسته بجستان، شمال شرق ایران

محمد قاسم زاده گنجه‌ای[۱]، فرشته مقامی[۲]، علیرضا کریمی[۳*]

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

چکیده

پسته یکی از محصولات مهم صادراتی، استراتژیک و سازگار با محیط‌های خشک ایران است. این مطالعه با هدف ارزیابی شاخص کیفیت خاک باغ‌های پسته در سطوح ژئومورفیک مختلف (کفه رسی غیرشور، حد واسط پدیمنت و کفه رسی شور، حد واسط مخروط‌افکنه و کفه‌رسی غیرشور، و کفه رسی شور) در دو بخش خاک سطحی (افق A) و کل خاک‌رخ (صفر تا ۱۵ سانتی‌متر)، و تأثیر آن بر عملکرد پسته در پلایای بجستان انجام شد. برای این منظور، ۱۲ خاک‌رخ در سطوح ژئومورفیک مزبور مطالعه شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. مجموعه حداقل داده (MDS) به روش تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA) انتخاب و شاخص کیفیت خاک به دو روش تجمعی و وزنی محاسبه شد. نتایج نشان داد که هم در لایه سطحی و هم کل خاک‌رخ، در تمام سطوح ژئومورفیک مورد مطالعه در باغ خوب، شاخص کیفیت خاک وزنی به نسبت شاخص کیفیت خاک تجمعی بالاتر بود. سطح ژئومورفیک کفه رسی شور، به‌دلیل تجمع املاح محلول، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و قرار گرفتن در نزدیکی کفه نمکی، در هر دو بخش لایه سطحی و کل خاک‌رخ، کمترین مقدار شاخص کیفیت خاک را به خود اختصاص داد. نتایج همچنین نشان داد که در هر دو لایه سطحی و کل خاک‌رخ، شاخص وزنی کیفیت خاک توانست ارتباط خوبی با عملکرد نشان دهد. بر این اساس، بهبود کیفیت خاک نه تنها در خاک سطحی، بلکه در لایه‌های عمقی خاک‌رخ، برای رسیدن به عملکرد مطلوب و پایدار این محصول در منطقه ضروری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص کیفیت خاک، تجزیه به مؤلفه اصلی، سطح ژئومورفیک، عملکرد پسته

[۱] استادیار پژوهش علوم خاک، بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

[۲] دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

[۳] استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

[*] نویسنده مسئول: Karimi-a@um.ac.ir

مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از سه جزء اصلی محیط‌زیست (آب، هوا و خاک) است که کیفیت و سلامت حیات سایر موجودات زنده و پایداری محیط زیست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین، خاک به‌عنوان بستر اصلی تولید برای امنیت غذایی، نقش مهمی در تصمیم‌گیری و مدیریت منابع دارد و به همین دلیل، ارزیابی کیفیت خاک در جهت بهبود و حفاظت از آن، ضروری است (Bunemann *et al.*, 2018; Andrews *et al.*, 2002). از آن‌جا که کاربران ارزیابی کیفیت خاک، اهداف متفاوتی دارند؛ تعریف کیفیت خاک بسته به نگرش کاربر و نوع استفاده از آن می‌تواند متفاوت باشد (Bunemann *et al.*, 2018). به هر حال، آن‌چه مهم می‌باشد، این است که کیفیت خاک بایستی دربرگیرنده قابلیت‌های تولید و جنبه‌های زیست‌محیطی خاک باشد؛ زیرا تنها تأکید بر تولید اثر نامطلوب بر محیط‌زیست دارد و تأکید تنها بر محیط زیست، منابع تولید را به خطر می‌اندازد. کارلن و همکاران (Karlen *et al.*, 1997) کیفیت خاک را توانایی خاک به‌عنوان یک منبع حیاتی در زیست‌بوم طبیعی و کشاورزی (زیست‌بوم مدیریت‌شده و تحت بهره‌برداری) برای انجام وظایف خود در جهت تولید پایدار محصولات گیاهی و جانوری، ضمن حفظ کیفیت آب، هوا، سلامت و سکونت انسان تعریف کردند. کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و باید از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک که حساس به تغییرات مدیریتی هستند، برای محاسبه آن استفاده کرد. در این راستا، دو رویکرد برای انتخاب ویژگی‌های خاک مؤثر بر کیفیت خاک وجود دارد. روش اول، استفاده از همه ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک با عنوان مجموعه کل داده‌ها (TDS: Total Data Set) و روش دوم، تعیین حداقل مجموع داده‌ها (MDS: Minimum Data Set) با استفاده از روش‌های آماری است (Reynolds *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2009).

بیشتر مطالعات انجام شده برای محاسبه کیفیت خاک، براساس ویژگی‌های سطحی خاک بوده است و براساس این تفکر بنا نهاده شده است که کاربری‌ها یا مدیریت‌های متفاوت، بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های سطحی خاک دارند (Reynolds *et al.*, 2009; Qi *et al.*, 2009). به همین دلیل، کمتر به ویژگی‌های عمقی خاک و تأثیر آن بر کیفیت خاک توجه شده است. بنابراین لازم است که ویژگی‌های منطقه و فرآیندهای پدوژنیکی مرتبط با تغییرات خواص خاک که روی بهره‌وری محصول اثرگذار هستند نیز انتخاب شوند، زیرا شاخص‌ها بایستی بیانگر پیچیدگی و عملکردهای مختلف خاک باشند (Vasu *et al.*, 2016). واسو و همکاران (Vasu *et al.*, 2016) در هند به ارزیابی کیفیت خاک با هدف ارزیابی بهره‌وری تولید پرداختند. آنها شاخص‌های کیفیت خاک را در دو عمق مختلف شامل خاک سطحی (صفر تا ۱۵ سانتی‌متر) و خاک‌رخ

(صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر) بررسی نمودند و نشان دادند که کیفیت محاسبه شده در خاک‌رخ، همبستگی بیشتری با عملکرد گندم داشت. مقامی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی شاخص کیفیت خاک در دو بخش خاک سطحی (افق Ap) و خاک‌رخ (صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر) در سامانه‌های مدیریتی سنتی و نوین در دشت نیشابور پرداختند. همبستگی نسبتاً خوب عملکرد محصولات مورد مطالعه، با شاخص کیفیت خاک، به‌ویژه کیفیت خاک در خاک‌رخ، نشان داد که ویژگی‌های عمق خاک نیز بر کیفیت خاک و به دنبال آن، عملکرد محصول، تأثیر زیادی دارند.

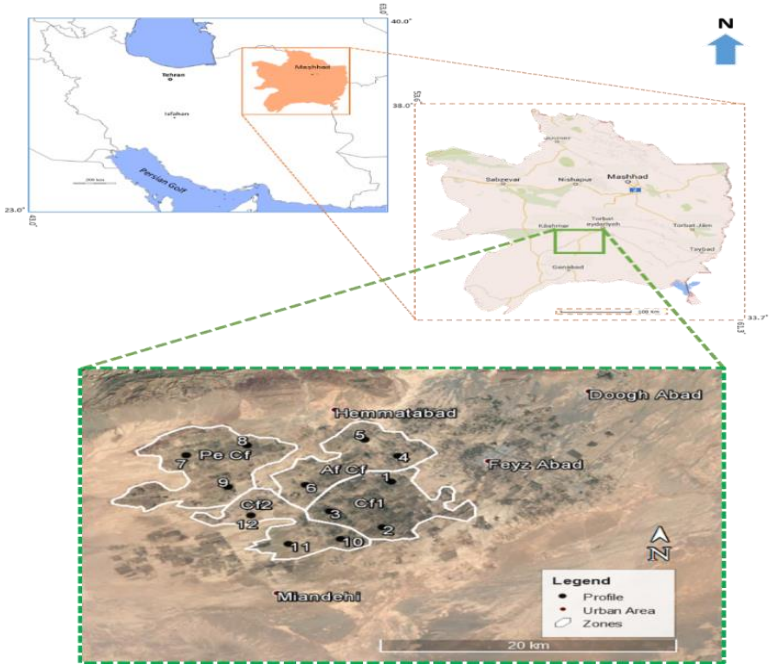
پسته یکی از محصولات مهم صادراتی، استراتژیک و سازگار با محیط‌های خشک است که در ایران، بیشتر در این مناطق و به‌ویژه در حاشیه یا داخل پلایاها کشت می‌شود. در هر سامانه کشاورزی، خاک و ویژگی‌های آن، نقش تعیین‌کننده بر رشد آن‌ها دارند. شناخت نوع خاک‌ها و خصوصیات مختلف آن‌ها کمک شایانی به تعیین محدودیت‌ها، پتانسیل‌ها و در نتیجه بهره‌برداری هر چه بهتر از آن‌ها می‌نماید. داشتن اطلاعات کافی درباره خصوصیات خاک‌های زیر کشت پسته، ما را در بهره‌برداری بهینه از این خاک‌ها کمک می‌نماید.

استان خراسان رضوی، یکی از استان‌های محل کشت پسته در ایران است و منطقه فیض‌آباد مه‌ولات، یکی از این مناطق مهم و عمده کشاورزی استان خراسان رضوی است که در حاشیه پلایای بجستان قرار دارد و با سطح زیر کشت حدود ۳۵۰۰۰ هکتار باغ پسته، بیشترین مساحت باغ‌های پسته استان را به خود اختصاص داده است (قاسم‌زاده گنجه‌ای، ۱۳۹۵). طی بازدیدهای صحرایی مشاهده شد که باغ‌های پسته با سن و مدیریت یکسان، از نظر وضعیت ظاهری و عملکرد، تفاوت‌های زیادی داشتند که می‌تواند به‌دلیل تفاوت در کیفیت خاک در بخش‌های مختلف اراضی باشد. ارزیابی کیفیت خاک و شناسایی عوامل خاکی مؤثر بر رشد پسته، راهگشای مدیریت بهتر این محصول مهم در مناطق خشک ایران است و کمک شایانی به تعیین محدودیت‌ها، استعداد و در نتیجه بهره‌برداری هر چه بهتر از آن‌ها می‌نماید. این مطالعه با هدف ارزیابی و مقایسه شاخص‌های کیفیت خاک در دو بخش خاک سطحی (افق A) و کل خاک‌رخ (صفر تا ۱۵۰ سانتی-متر) در باغ‌های پسته کشت‌شده در بخشی از منطقه فیض‌آباد مه‌ولات استان خراسان رضوی و ارتباط آن‌ها با رشد پسته در سطوح ژئومورفیک مختلف موجود در منطقه انجام شد. به‌علاوه، ویژگی‌های مؤثر بر رشد و عملکرد پسته تعیین گردید.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۲۰ هزار هکتار در جنوب استان خراسان رضوی در منطقه فیض‌آباد مه‌ولات و در محدوده طول‌های جغرافیایی ′۳۳ °۵۸ تا ′۴۶ °۵۸ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۵۸ °۳۴ تا ′۱ °۳۵ شمالی واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از اراضی شمال شهر فیض‌آباد به کفه نمکی پلایای بجستان ختم می‌شود. منطقه از نظر آب و هوایی دارای اقلیم خشک با زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم و خشک است. میانگین دما و بارش سالانه آن در یک دوره آماری ده ساله (سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۶)، به‌ترتیب، ۱۷/۳ درجه سلسیوس و ۱۹۳ میلی‌متر است. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه مورد مطالعه، به‌ترتیب، اریدیک و ترمیک است (صاحب‌جمع، ۱۳۷۹). سطوح ژئومورفیک مورد بررسی در اشکال اراضی مختلف موجود در منطقه (مخروط‌افکنه، حد واسط مخروط‌افکنه - کفه‌رسی، پدیمنت و کفه رسی) شامل کفه‌رسی غیرشور (Cf1) - حد واسط مخروط‌افکنه-کفه‌رسی غیرشور (Af-Cf)، حد واسط پدیمنت-کفه رسی شور (Pe-Cf)، و کفه‌رسی شور (Cf2) بودند. در کفه رسی غیرشور، خاک‌های عمیق و بدون سنگ‌ریزه وجود دارد. کفه‌رسی شور به‌دلیل حرکت مویینگی آب به سمت سطح خاک، شورتر است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی به‌همراه سطوح ژئومورفیک مختلف آن و موقعیت خاک‌رخ‌های حفرشده در باغ‌های انتخاب شده

نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

براساس بازدیدهای صحرایی، در هر سطح ژئومورفیک براساس خصوصیات ظاهری و عملکرد درختان پسته، سه باغ خوب، متوسط و ضعیف انتخاب شد. میانگین عملکرد پسته در باغ‌های خوب، متوسط و ضعیف، به‌ترتیب، ۱۹/۰۵، ۱۲/۱۴ و ۹/۶۳ کیلوگرم در هر درخت بود. بیشترین و کمترین ارتفاع درخت در باغ خوب وضعیف ۲۴۹ و ۲۲۵ سانتی‌متر بود. باغ‌ها به نحوی انتخاب شدند که از نظر رقم، کیفیت آب، دور آبیاری و سن درخت و مدیریت مشابه باشند. در هر باغ، یک خاک‌رخ (در مجموع، ۱۲ خاک‌رخ) در سطوح ژئومورفیک کفه‌رسی غیرشور (خاک‌رخ‌های شماره ۱، ۲ و ۳)، حد واسط مخروط‌افکنه و کفه‌رسی غیرشور (خاک‌رخ‌های شماره ۴، ۵ و ۶)، حد واسط پدیمنت و کفه‌رسی شور (خاک‌رخ‌های شماره ۷، ۸ و ۹) و کفه-رسی شور (خاک‌رخ‌های شماره ۱۰، ۱۱ و ۱۲) تشریح شد و از افق‌های ژنتیکی نمونه‌برداری قرار شد. در نهایت، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردیدند. سه درخت پسته در اطراف هر خاک‌رخ انتخاب شد و عملکرد آنها اندازه‌گیری شد و میانگین عملکرد این سه درخت در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

پس از هوا خشک کردن نمونه‌های خاک و عبور دادن آن‌ها از الک دو میلی‌متری، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی لازم بر روی آن‌ها انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Boix- Fayos, 1962)، pH در گل اشباع با دستگاه pHمتر مدل Jenwey و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع خاک توسط هدایت‌سنج الکتریکی مدل Jenwey اندازه‌گیری شد. کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون برگشتی (Page *et al.*, 1992)، گچ به روش ترسیب با استون (Nelson and Sommers, 1982)، کربن آلی به روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1982)، کلسیم و منیزیم محلول به روش تیتراسیون با EDTA، سدیم محلول توسط دستگاه شعله‌سنجی مدل Jenwey، نیتروژن کل به روش کجلدال (Waling *et al.*, 1989)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، پتاسیم محلول (قابل جذب) با روش استات آمونیوم (Jonse, 2001) و بور به روش آزومتین- H (Keren, 1996) اندازه‌گیری گردید. بی‌کربنات در عصاره اشباع خاک و به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (USEPA, 1996). سولفات در محلول عصاره خاک، به روش متیلن بلو اندازه‌گیری شد (Tabatabai, 1996). عناصر آهن، روی، منگنز، مس و بور نیز با استفاده از DTPA عصاره‌گیری و با دستگاه جذب اتمی مدل PG- 990 گروه علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری شد. نسبت جذب سطحی سدیم ، با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول، براساس مول در لیتر، با استفاده از معادله ۱، محاسبه شد.

معادله $$SAR = \frac{Na+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$ (۱)

محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک در دو بخش خاک سطحی (افق A) و کل خاک‌رخ (صفر تا ۱۵۰ سانتی‌متر) محاسبه شد. این شاخص در سه مرحله: (الف) انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، (ب) نمره‌دهی و هم واحدکردن ویژگی‌ها به روش خطی و (ج) ادغام نمرات محاسبه‌شده به دو روش تجمعی و وزنی، محاسبه شد. در هر خاک‌رخ برای رسیدن به یک مقدار واحد از هر ویژگی، ابتدا آن خاک‌رخ به شش قسمت مساوی (اعماق صفر تا ۲۵، ۵۰-۲۵، ۷۵-۵۰، ۱۰۰- ۷۵، ۱۲۵-۱۰۰ و ۱۵۰-۱۲۵ سانتی‌متر) تقسیم شد. برای محاسبه کیفیت خاک، برای هر عمق، یک ضریب براساس پیشنهاد سایس و همکاران (Sys *et al.*, 1991) استفاده شد. ضرایب وزنی مورد استفاده برای شش عمق گفته شده به‌ترتیب، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ بودند.

مرحله ۱: انتخاب حداقل داده

هدف اصلی انتخاب حداقل داده، کاهش تعداد متغیرها بـه یـک مجموعه کوچک‌تر است به‌نحوی کـه ایـن مجموعـه کوچـک، بیشـترین تغییرات موجود در داده‌ها را تبیین کند و اطلاعات موجود در متغیرهـا نیز حفظ شود.

انتخاب حداقل داده به روش تجزیه به مؤلفه اصلی (PCA-MDS)

در این روش، حداقل داده برای افق A و همچنین برای کل خاک‌رخ، با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲، محاسبه شد. به‌منظور کاهش تعداد مؤلفه‌ها و انتخاب MDS، از آزمون اسکری (Andrews and Carroll, 2001) استفاده شد. در هر مؤلفه اصلی، تنها متغیرهایی که مقادیر قدرمطلق وزنشان، جزء ۱۰ درصد بالاترین وزن متغیر بودند، به‌عنوان MDS در نظر گرفته شدند (همتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Andrews and Carroll, 2001).

مرحله ۲: نمره‌دهی

تمامی ویژگی‌ها در دو سطح افق A و خاک‌رخ به روش نمره‌دهی خطی، بین صفر تا یک در سه گروه، بخش‌بندی شدند: (الف) هرچه بیشتر، بهتر (مانند کربن آلی) با استفاده از معادله (۱)، (ب) هرچه کمتر، بهتر (مانند قابلیت هدایت الکتریکی و نسبت جذب سطحی سدیم) با استفاده از معادله (۲) و (ج) حد بهینه، بهتر (مانند pH، پتاسیم قابل استفاده، کربنات کلسیم معادل

و عناصر کم‌مصرف) که براساس مقادیر بهینه موجود در منابع امتیازدهی شدند (ملکوتی، ۱۳۹۳؛ حسینی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۶). در این حالت، اگر مقدار متغیر از حد بهینه بیشتر باشد از معادله ۲ و اگر مقدار متغیر از حد بهینه کمتر باشد از معادله ۱ برای امتیازدهی استفاده می‌شود.

معادله (۱)

$$SL = (x - m)/(n - m)$$

معادله

(۲)

$$SL = 1 - ((x - m)(n - m))$$

که در این معادلات SL، نمره تعلق‌گرفته به هر ویژگی؛ x، ویژگی مورد نظر؛ m، کمترین و n، بیشترین مقدار ویژگی مورد نظر می‌باشند (Askari and Holden, 2014).

مرحله ۳: ادغام و محاسبه شاخص کیفیت خاک

بعد از نمره‌دهی و بی‌واحد کردن (بدون بُعد نمودن) فاکتورها، به دو روش زیر فاکتورهای مزبور با هم تلفیق شدند و شاخص کیفیت خاک (SQI = Soil Quality Index) تعیین شد (Liu *et al.*, 2014).

۱- شاخص تجمعی ساده (Additive)

معادله

(۳)

$$SQIA = \sum_{i=1}^{n} si/n$$

۲- شاخص تجمعی وزنی (weighted)

معادله (۴)

$$SQIW = \sum_{i=1}^{n} si \times wi$$

که SQI_A و SQI_W به‌ترتیب، شاخص تجمعی ساده و وزنی کیفیت خاک، s_i، نمره تعلق‌گرفته به هر ویژگی، n، تعداد ویژگی و Wi، وزن تعلق‌گرفته به هر ویژگی هستند. به‌منظور تعیین وزن تعلق‌یافته به ویژگی‌های خاک، برای مجموعه MDS سهم هر ویژگی یا واریانس مشترک محاسبه شد. سپس نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها در مجموعه به‌عنوان وزن نهایی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد (Masto *et al.*, 2008).

نتایج

۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک سطحی (افق A) و خاک‌رخ

خلاصه برخی آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک در لایه سطحی و خاک‌رخ‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به شرایط اقلیمی، کمترین ضریب تغییرات مربوط به pH و EC در هر دو سطح و بیشترین ضریب تغییرات مربوط به کربن آلی، نیتروژن، فسفر و کلر در سطح و فسفر و پتاسیم در خاک‌رخ می‌باشد. با این وجود، به‌نظر می‌رسد که تغییرپذیری نیتروژن، پتاسیم، فسفر و کربن آلی، به‌عنوان ویژگی‌هایی از خاک که نقش مهمی در عملکرد

محصول و کیفیت خاک دارند، بیشتر از سایر ویژگی‌ها تحت تأثیر مدیریت هستند. هرچه از سمت مخروط‌افکنه به سمت کفه رسی پلایا نزدیک می‌شویم با کاهش شیب، بافت خاک ریزتر می‌شود به نحوی که بافت از لوم شنی در خاک‌رخ ۱ به لوم رسی در خاک‌رخ ۱۱ می‌رسد. در همین امتداد، میزان سنگریزه سطحی نیز کاهش پیدا می‌کند و در کفه‌رسی مقدار سنگریزه به صفر می‌رسد.

در خاک‌های حد واسط مخروط‌افکنه-کفه رسی و پدیمنت-کفه رسی، شن، بخش غالب ذرات خاک را تشکیل می‌دهد، ولی در خاک‌های دیگر مقدار شن کم می‌شود و مقدار سیلت و رس افزیش پیدا می‌کند. با توجه به آهکی بودن ماده مادری و حلالیت کم آن در مقایسه با سایر نمک‌های محلول، میزان کربنات کلسیم معادل روند خاصی ندارد.

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های خاک مطالعه‌شده در منطقه مورد مطالعه

ویژگی‌های خاک	سطحی				خاک‌رخ			
	میانگین	انحراف معیار	دامنه	ضریب تغییرات (%)	میانگین	انحراف معیار	دامنه	ضریب تغییرات (%)
pH	۷/۷۹	۰/۱۸	۷/۵۰-۸/۰۰	۲/۳۵	۷/۷۶	۰/۱۸	۷/۵۰-۸/۰۰	۲/۴۱
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	۷/۳۰	۹/۷۹	۲/۶۷-۳۴/۰۰	۱۳/۴۰	۶/۷۳	۹/۱۶	۲/۸۷-۳۵/۷۶	۱۳/۶۱
کربنات کلسیم معادل (%)	۱۶/۵۸	۳/۶۲	۱۲/۰۰-۲۴/۰۰	۲۱/۸۸	۱۸/۶۶	۲/۴۹	۱۴/۰۰-۲۴/۰۰	۱۳/۳۸
کربن آلی (%)	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۰۵-۰/۵۴	۵۶/۴۱	۰/۲۲	۰/۰۹	۰/۰۹-۰/۳۹	۴۳/۳۴
شن (%)	۳۸/۲۵	۱۴/۶۹	۲۰/۰۰-۶۱/۰۰	۳۸/۴۰	۴۳/۵۸	۱۵/۴۰	۲۳/۰۰-۶۹/۰۰	۳۵/۳۴
سیلت (%)	۴۳/۹۱	۱۲/۰۱	۲۵/۰۰-۶۲/۰۰	۲۷/۳۴	۴۲/۶۶	۱۰/۱۰	۲۵/۰۰-۵۸/۰۰	۲۳/۶۷
رس (%)	۱۷/۸۳	۴/۳۴	۱۱/۰۰-۲۳/۰۰	۲۴/۳۶	۱۵/۸۳	۴/۰۶	۱۱/۰۰-۲۴/۰۰	۲۵/۶۶
نیتروژن کل (%)	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱-۰/۰۶	۵۰/۵۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱-۰/۱۹	۱۱/۶۵
فسفر قابل استفاده (mg/kg)	۷/۰۸	۳/۹۲	۱/۶۰-۱۴/۸۰	۵۵/۴۰	۵/۷۱	۲/۳۸	۰/۶۰-۱۲/۸۰	۵۷/۳۸
پتاسیم قابل استفاده (mg/kg)	۱۸۶/۹۱	۷۱/۰۷	۸۶/۰۰-۳۰۵/۰	۳۸/۰۲	۱۷۰/۵۸	۸۱/۲۳	۵۸/۰۰-۶۹/۰۰	۴۷/۶۲
آهن قابل جذب (mg/kg)	۳/۶۶	۱/۳۰	۱/۱۷-۶/۱۲	۳۵/۵۲	۳/۶۷	۱/۳۴	۱/۷۲-۵/۸۶	۳۶/۵۲
منگنز قابل جذب (mg/kg)	۴/۶۵	۱/۵۴	۲/۲۳-۸/۲۲	۳۳/۱۹	۵/۱۱	۱/۲۴	۳/۷۶-۷-۴۱	۲۴/۳۷
روی قابل جذب (mg/kg)	۰/۴۰	۰/۱۸	۰/۱۴-۰/۶۰	۴۵/۹۸	۰/۳۹	۰/۱۵	۰/۱۷-۰/۶۱	۳۹/۵۴
مس قابل جذب (mg/kg)	۰/۵۹	۰/۱۶	۰/۳۸-۰/۹۵	۲۸/۲۲	۰/۵۷	۰/۱۸	۰/۳۶-۰/۹۸	۳۳/۰۵
بور قابل جذب (mg/kg)	۲/۳۲	۱/۸۸	۰/۸۵-۷۰.۶	۸۱/۳۱	۲/۲۱	۱/۴۰	۰/۹۸-۶/۱۰	۶۳/۵۲
کلسیم محلول (meq/l)	۳۲/۵۰	۵/۶۴	۲۶/۰۰-۴۴/۰۰	۱۷/۳۸	۳۱/۵۰	۶/۵۱	۱۹/۰۰-۳۸/۰۰	۲۰-۶۸
منیزیم محلول (meq/l)	۲۲/۱۶	۵/۰۶	۱۶/۰۰-۳۱/۰۰	۲۲/۸۲	۲۱/۵۰	۴/۱۲	۱۲/۰۰-۲۸/۰۰	۱۹/۱۷
سدیم محلول (meq/l)	۴۵/۳۳	۱۳/۶۵	۲۹/۰۰-۷۸/۰۰	۳۰/۱۱	۴۴/۱۶	۱۲/۱۳	۲۷/۰۰-۷۱/۰۰	۲۷/۴۷
بی کربنات محلول (meq/l)	۳/۷۴	۱/۵۳	۱/۵۰-۶/۳۰	۴۰/۹۰	۴/۴۴	۱/۰۷	۲/۳۰-۶/۸۰	۲۴/۰۸
کلر محلول (meq/l)	۲۲/۱۱	۱۲/۸۰	۹/۵۰-۵۳/۸۰	۵۷/۹۱	۲۳/۰۹	۸/۱۹	۱۶/۵۰-۳۹/۶۰	۳۵/۴۹
سولفات محلول (meq/l)	۴۰/۴۴	۱۷/۹۲	۱۸/۱۰-۶۶/۵۰	۴۴/۳۳	۴۳/۲۹	۱۶/۸۸	۲۳/۶۵-۷۸/-۲۱	۳۸/۹۹
نسبت جذب سطحی سدیم	۸/۷۵	۲/۹۴	۶/۱۱-۱۶/۲۸	۳۳/۵۸	۸/۹۳	۲/۲۳	۶/۸۶-۱۴/۸۷	۲۴/۹۶

۲- شاخص کیفیت خاک

الف. انتخاب حداقل داده (MDS) به روش تجزیه به مؤلفه اصلی در خاک سطحی

در این روش تعداد مؤلفه‌های استخراج شده در هر مدل برابر است با تعداد متغیرهایی که بررسی می‌شوند. معمولاً دو یا سه مؤلفه اول، مقدار قابل توجهی از پراکندگی داده‌ها را در نظر می‌گیرند و دارای ارزش ویژه بزرگ‌تر یا مساوی یک هستند. در این سطح، شش مؤلفه که دارای مقادیر ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک بودند، انتخاب شدند (جدول ۲). بر این اساس هر یک از این مؤلفه‌ها به‌صورت جداگانه به‌ترتیب ۳۵/۶۳، ۱۵/۷۰، ۱۴/۷۲، ۱۱/۱۴، ۷/۳۴ و ۴/۸۸ درصد از تغییرات واریانس و در مجموع ۸۹/۴۳ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند.

جدول ۲- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های سطحی مؤثر بر کیفیت خاک بر مبنای شش مؤلفه اول

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
بردار ویژه	۷/۸۴	۳/۴۵	۳/۲۴	۲/۴۵	۱/۶۱	۱/۰۷
واریانس (٪)	۳۵/۶۳	۱۵/۷۰	۱۴/۴۲	۱۱/۱۴	۷/۳۴	۴/۸۸
واریانس تجمعی (٪)	۳۵/۶۳	۵۱/۳۴	۶۶/۰۶	۷۷/۲۰	۸۴/۵۵	۸۹/۴۳

مقادیر ویژه مؤلفه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در مؤلفه اول، کربن آلی دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، نیتروژن و SAR دارای بیشترین وزن هستند (جدول ۳) که براساس همبستگی معنی‌دار بین نیتروژن و کربن آلی (جدول ۴)، نیتروژن از مجموعه حذف شد؛ ولی به‌دلیل عدم همبستگی بین کربن آلی و SAR، این دو ویژگی در مجموعه حداقل داده وارد شدند. در مؤلفه دوم، منیزیم با توجه به بالا بودن وزنش (جدول ۳)، به‌عنوان تنها متغیری که دارای بزرگ‌ترین بردار ویژه است، به‌عنوان حداقل داده انتخاب شد. در مؤلفه سوم، شن دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، pH، کربنات کلسیم معادل، درصد رس، منگنز و روی دارای بیشترین وزن هستند (جدول ۳) که براساس عدم همبستگی بین این ویژگی‌ها با درصد شن (جدول ۴)، همه آن‌ها در مجموعه MDS باقی ماندند. در مؤلفه چهارم، قابلیت هدایت الکتریکی دارای بیشترین وزن است که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، کربنات کلسیم معادل و فسفر دارای بیشترین وزن هستند (جدول ۳) که براساس عدم همبستگی بین این دو ویژگی با قابلیت هدایت الکتریکی (جدول ۴)، همه آن‌ها در مجموعه MDS باقی ماندند. در مؤلفه پنجم، کلسیم به‌عنوان تنها متغیری که دارای بزرگ‌ترین بردار ویژه است، به‌عنوان حداقل داده انتخاب

شد. در مؤلفه ششم، مس دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، منگنز دارای بیشترین وزن است که براساس عدم همبستگی بین این ویژگی با مس، هر دو در مجموعه MDS باقی ماندند (جدول ۳). در مجموع در این سطح، ۱۳ ویژگی به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

جدول ۳- انتخاب حداقل داده به روش PCA در خاک سطحی برای شش مؤلفه اول*

ویژگی	مؤلفه					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
pH	۰/۰۲۱	۰/۷۱۳	**۰/۵۶۰**	۰/۱۳۳	-۰/۰۰۳	۰/۱۴۹
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۶۲۶	-۰/۱۹۹	۰/۳۲۴	**۰/۵۸۸**	۰/۲۳۷	۰/۱۱۶
کربنات کلسیم معادل (%)	۰/۱۶۶	۰/۳۱۹	**۰/۵۲۵**	**-۰/۵۴۶**	۰/۱۸۶	۰/۲۴۰
کربن آلی (%)	**-۰/۹۲۵**	-۰/۰۱۷	۰/۱۱۰	۰/۲۲۳	۰/۱۲۸	۰/۰۴۳
شن (%)	-۰/۲۵۶	۰/۶۲۹	**-۰/۵۸۳**	۰/۲۸۶	-۰/۰۱۸	۰/۲۴۲
سیلت (%)	۰/۱۱۷	**-۰/۶۴۷**	۰/۵۱۵	-۰/۳۰۲	۰/۰۹۰	-۰/۳۱۳
رس (%)	-۰/۵۴۳	-۰/۳۳۸	**۰/۵۴۹**	-۰/۱۳۱	-۰/۱۸۷	۰/۰۴۹
نیتروژن کل (%)	**۰/۸۹۰**	۰/۰۵۵	۰/۰۰۸	۰/۲۶۰	۰/۱۸۸	۰/۰۳۴
فسفر قابل استفاده (mg/kg)	-۰/۳۶۵	-۰/۴۷۷	۰/۰۹۴	**۰/۵۵۶**	۰/۰۳۷	۰/۳۵۲
پتاسیم قابل استفاده (mg/kg)	-۰/۶۴۵	۰/۰۷۹	۰/۵۳۲	۰/۲۱۱	-۰/۱۸۳	۰/۳۳۰
آهن قابل جذب (mg/kg)	-۰/۶۲۸	-۰/۳۲۴	۰/۴۹۳	-۰/۰۱۴	-۰/۲۱۵	۰/۰۵۴
منگنز قابل جذب (mg/kg)	-۰/۵۰۰	-/۰۸۰	**۰/۵۴۸**	-۰/۰۲۴	۰/۳۰۴	**-۰/۴۰۱**
روی قابل جذب (mg/kg)	-۰/۵۸۰	۰/۴۹۰	**۰/۵۸۱**	-۰/۱۶۶	-۰/۰۴۲	-۰/۰۷۷
مس قابل جذب (mg/kg)	-۰/۶۲۹	-۰/۴۹۵	۰/۲۵۸	-۰/۲۶۲	-۰/۰۶۳	**-۰/۴۳۴**
بور قابل جذب (mg/kg)	-۰/۲۶۵	-۰/۰۳۷	-۰/۱۳۷	-۰/۲۴۰	۰/۷۹۲	-۰/۱۶۶
کلسیم محلول(meq/l)	-۰/۰۷۳	**۰/۸۷۹**	۰/۱۷۵	-۰/۲۷۳	۰/۲۱۲	۰/۰۵۳
منیزیم محلول (meq/l)	۰/۸۱۹	۰/۱۳۳	۰/۳۰۵	۰/۳۶۳	۰/۲۲۲	۰/۰۵۶
سدیم محلول (meq/l)	۰/۷۱۰	-۰/۱۰۵	-۰/۱۵۴	-۰/۵۰۹	-۰/۰۳۹	۰/۳۸۸
بی کربنات محلول (meq/l)	۰/۵۳۴	۰/۳۹۶	۰/۲۳۰	-۰/۰۷۷	-۰/۶۳۸	-۰/۰۰۴
کلر محلول (meq/l)	۰/۸۰۴	-۰/۲۵۶	۰/۰۰۷	-۰/۳۴۸	۰/۲۶۰	۰/۲۰۴
سولفات محلول (meq/l)	**۰/۸۲۷**	۰/۰۱۱	۰/۲۹۳	۰/۴۳۶	۰/۰۶۰	۰/۰۲۶
نسبت جذب سطحی سدیم	۰/۷۷۱	۰/۱۳۳	۰/۲۹۱	۰/۴۳۸	۰/۲۱۹	-۰/۰۳۶

* اعدادی که پررنگ هستند و زیر آنها خط کشیده شده، در مجموعه MDS باقی ماندند.

جدول ۴- ضرایب همبستگی (پیرسون) بین ویژگی‌های خاک سطحی (* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال کمتر از ۵ و ۱ درصد)

	کربن آلی	نیتروژن کل	نسبت جذب سدیم	اسیدیته	کربنات کلسیم معادل	شن	رس	پتاسیم قابل جذب	منگنز قابل جذب	مس قابل جذب	فسفر قابل جذب
نیتروژن کل	۰/۹۸**										
نسبت جذب سدیم	-۰/۶۴*	-۰/۶۰*									
اسیدیته	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۶								
کربنات کلسیم معادل	-۰/۱۷	-۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۳۶							
شن	۰/۱۹	۰/۲۱	-۰/۲۳	۰/۱۵	-۰/۲۵						
رس	-۰/۴۴	-۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۲۶	-۰/۷۱**					
پتاسیم قابل استفاده	۰/۶۹*	۰/۶۶*	-۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۱۲	۰/۰۳	-۰/۱۹				
منگنز قابل استفاده	۰/۵۰	۰/۴۳	-۰/۲۲	-/۱۸	۰/۲۳	-۰/۱۶	-۰/۱۰	۰/۴۱			
مس قابل استفاده	۰/۵۵	۰/۵۲	-۰/۵۴	-۰/۱۴	-/۰۴	-۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۶۱*	۰/۲۲		
فسفر قابل اشتفاده	/۵۴	۰/۴۸	-۰/۰۹	-۰/۲۸	-۰/۲۷	-۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۰۷	۰/۴۴	
هدایت الکتریکی	-۰/۳۹	-۰/۳۶	۰/۸۹**	۰/۱۰	۰/۰۳	-۰/۲۷	۰/۳۸	-۰/۰۹	-۰/۱۱	-۰/۳۵	۰/۲۵

ب. انتخاب حداقل داده (MDS) به روش PCA در خاک‌رخ

در این سطح، پنج مؤلفه که دارای مقادیر ارزش ویژه بزرگتر از یک بودند، انتخاب شدند (جدول ۵). بر این اساس، هر یک از این مؤلفه‌ها به‌صورت جداگانه به‌ترتیب ۳۳/۲۵، ۲۲/۲۹، ۱۴/۶۵، ۱۱/۱۴، ۱۰/۷۶ و ۷/۴۳ درصد از تغییرات واریانس و در مجموع ۸۸/۳۳ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند.

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های خاک‌رخ بر مبنای پنج مؤلفه اول

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
بردار ویژه	۷/۳۱	۴/۸۹	۳/۲۲	۲/۳۶	۱/۶۳
واریانس (٪)	۳۳/۲۵	۲۲/۲۲	۱۴/۶۵	۱۰/۷۶	۷/۴۳
واریانس تجمعی (٪)	۳۳/۲۵	۵۵/۴۸	۷۰/۱۳	۸۰/۹۰	۸۸/۳۳

در مؤلفه اول، کربن آلی دارای بالاترین مقدار می‌باشد که براساس ۱۰ درصد مقدار این متغیر، منگنز و سدیم دارای بیشترین وزن هستند که براساس همبستگی بین کربن آلی و منگنز (جدول ۶) در سطح یک درصد، منگنز از مجموعه داده‌ها حذف شد ولی به‌دلیل عدم همبستگی بین کربن آلی و سدیم (جدول ۷)، این دو ویژگی در مجموعه MDS باقی ماندند. در مؤلفه دوم، مقدار رس دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، مقدار شن دارای بیشترین وزن بود (جدول ۶) که به‌دلیل همبستگی بین این دو ویژگی (جدول ۷) و بالاتر بودن وزن درصد رس، شن از مجموعه MDS حذف شد. در مؤلفه سوم، منیزیم دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، کلسیم دارای بیشترین وزن است (جدول ۶)

که به‌دلیل عدم همبستگی این دو ویژگی (جدول ۷)، هر دو مقدار در مجموعه MDS باقی ماندند. در مؤلفه چهارم، عنصر بور دارای بالاترین وزن می‌باشد که براساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، قابلیت هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل دارای بیشترین وزن هستند (جدول ۶) که براساس همبستگی بین بور و قابلیت هدایت الکتریکی (جدول ۷) و بالاتر بودن وزن بور، قابلیت هدایت الکتریکی از مجموعه MDS حذف شد؛ ولی به‌دلیل عدم همبستگی بین بور و کربنات کلسیم معادل، این دو ویژگی در مجموعه MDS باقی ماندند. در مؤلفه پنجم، نیتروژن به‌عنوان تنها متغیری که دارای بزرگ‌ترین بردار ویژه است (جدول ۶)، به‌عنوان حداقل داده انتخاب شد. در مجموع در این سطح هشت ویژگی به‌عنوان MDS انتخاب شدند.

جدول ۶- ضرایب همبستگی (پیرسون) بین ویژگی‌های خاک‌رخ (* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال کمتر از ۵ و ۱ درصد)

	کربن آلی	سدیم محلول	منگنز قابل استفاده	شن	شن رس	کلسیم محلول	منیزیم محلول	بور قابل استفاده	هدایت الکتریکی
سدیم محلول	۰/۹۸**								
منگنز قابل استفاده	-۰/۶۴*	-۰/۶۰*							
شن	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۲۶						
رس	-۰/۱۷	-۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۳۶					
کلسیم محلول	۰/۱۹	۰/۲۱	-۰/۲۳	۰/۱۵	-۰/۲۵				
منیزیم محلول	-۰/۴۴	-۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۰۹	۰/۲۶	۰/۷۱**			
بور قابل استفاده	۰/۶۹*	۰/۶۶*	-۰/۲۵	۰/۴۴	۰/۱۲	۰/۰۳	-۰/۱۹		
هدایت الکتریکی	۰/۵۰	۰/۴۳	-۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۲۳	-۰/۱۶	-/۱۰	۰/۴۱	
کربنات کلسیم معادل	۰/۵۵	۰/۵۲	-۰/۵۴	-۰/۱۴	۰/۰۴	-۰/۲۶	۰/۰۳	۰/۶۱*	۰/۲۲

جدول ۷- انتخاب حداقل داده به روش PCA در خاک‌رخ برای پنج مؤلفه اول*

ویژگی	مؤلفه				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
اسیدیته	۰/۲۶۶	۰/۳۱۱	۰/۷۲۰	۰/۳۷۴	-۰/۳۴۱
قابلیت هدایت الکتریکی (dS/m)	-۰/۶۰۶	۰/۳۹۰	-۰/۳۵۱	۰/۵۰۷	۰/۱۰۴
کربنات کلسیم معادل (%)	-۰/۳۱۵	۰/۴۸۹	۰/۵۱۹	۰/۵۳۰	-۰/۱۰۷
کربن آلی (%)	۰/۸۷۹	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶	۰/۴۳۰	-۰/۰۹۰
شن (%)	۰/۲۴۹	-۰/۸۴۴	۰/۲۷۹	۰/۳۵۰	۰/۰۴۶
سیلت (%)	۰/۲۲۴	۰/۷۸۳	-۰/۲۸۵	-۰/۳۸۱	-/۱۰۰
رس (%)	-۰/۲۰۷	۰/۹۲۶	۰/۱۵۵	-۰/۱۳۰	-۰/۰۳۹
نیتروژن کل (%)	۰/۱۹۸	-۰/۳۲۵	۰/۰۴۰	۰/۰۳۷	۰/۸۸۵
فسفر قابل استفاده (mg/kg)	۰/۶۲۱	۰/۴۰۷	۰/۴۷۹	۰/۲۷۳	۰/۱۷۹
پتاسیم قابل استفاده (mg/kg)	۰/۷۴۸	۰/۳۲۷	۰/۱۲۲	۰/۲۶۰	۰/۳۸۸
آهن قابل جذب (mg/kg)	۰/۷۵۶	۰/۵۲۳	۰/۰۴۵	-۰/۰۹۱	۰/۰۸۹
منگنز قابل جذب (mg/kg)	۰/۸۰۱	۰/۴۴۱	-۰/۰۲۹	۰/۱۹۲	-۰/۰۶۴
روی قابل جذب (mg/kg)	۰/۷۶۹	۰/۲۲۲	۰/۴۵۱	۰/۱۸۰	-۰/۲۸۷
مس قابل جذب (mg/kg)	۰/۷۳۹	۰/۴۶۱	۰/۰۷۲	-۰/۳۳۳	۰/۲۴۹
بور قابل جذب (mg/kg)	-۰/۰۴۲	۰/۰۹۷	۰/۷۶۱	۰/۰۱۸	۰/۵۰۴
کلسیم محلول (meq/l)	-/۰۹۴	-۰/۳۰۰	۰/۸۶۲	۰/۱۸۸	-۰/۰۵۱
نیزیم محلول (meq/l)	-۰/۸۰۴	۰/۲۶۰	۰/۲۶۷	۰/۳۶۵	۰/۲۴۰
سدیم محلول (meq/l)	-۰/۴۵۶	-۰/۴۶۸	۰/۱۴۶	-۰/۲۴۳	۰/۰۶۴
بی‌کربنات محلول (meq/l)	-۰/۴۱۳	-۰/۶۸۸	۰/۱۰۳	۰/۳۰۸	-۰/۰۴۶
کلر محلول (meq/l)	-۰/۶۱۳	۰/۳۰۶	۰/۴۷۲	-۰/۲۷۵	۰/۱۲۸
سولفات محلول (meq/l)	-۰/۷۸۰	-/۳۵۰	-۰/۰۴۱	۰/۴۳۱	۰/۱۱۶
نسبت جذب سدیم	-۰/۷۰۳	۰/۱۸۳	-۰/۱۵۶	۰/۵۵۳	-۰/۰۴۶

* اعدادی که پررنگ هستند و زیر آنها خط کشیده شده، در مجموعه MDS باقی ماندند.

ج. شاخص کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ در باغ‌های پسته در مجموعه MDS

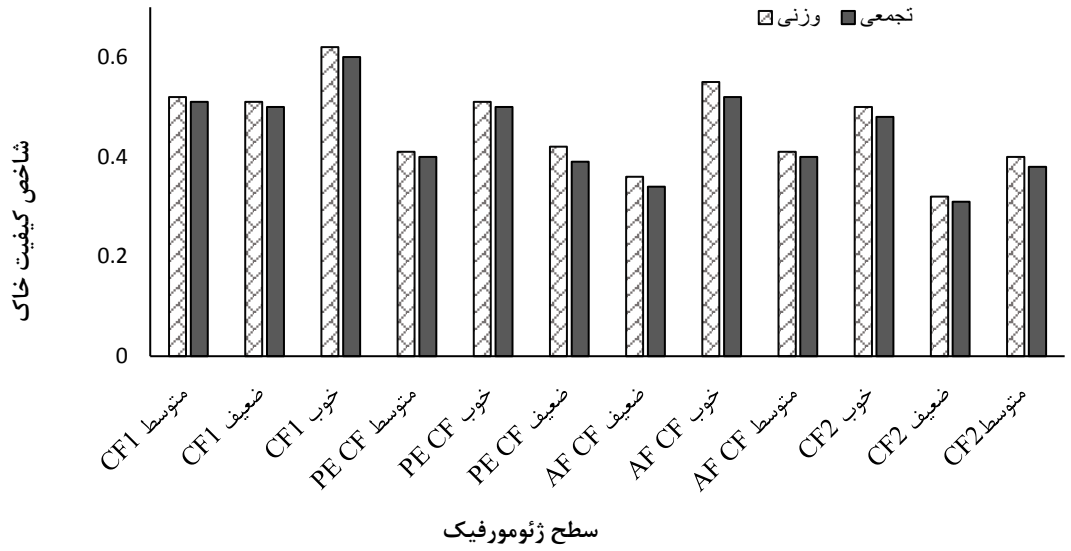
با توجه به جدول شماره ۸ در لایه سطحی و خاک‌رخ، در تمام سطوح ژئومورفیک مورد مطالعه در باغ خوب، شاخص کیفیت خاک وزنی، بیشتر از شاخص

کیفیت خاک تجمعی بود. با توجه به نتایج به‌نظر می‌رسد که نوع سطح ژئومورفیک و به دنبال آن، تغییر در برخی از خصوصیات خاک مانند تغییر در میزان نمک‌های محلول، مقدار شن و سنگریزه در خاک‌رخ، بر تغییرات شاخص کیفیت خاک مؤثر بوده است. سطح ژئومورفیک کفه رسی شور (Cf2)، به‌دلیل تجمع نمک‌های محلول، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و قرار گرفتن در نزدیکی کفه نمکی است، هم در لایه سطحی و هم خاک‌رخ (به‌ویژه خاک‌رخ‌های شماره ۱۱ و ۱۲)، کمترین مقدار شاخص کیفیت خاک را به خود اختصاص داد (شکل‌های ۲ و ۳). کفه نمکی، پست‌ترین بخش پلایا است که محل تجمع نمک‌ها محلول به صورت یک لایه بر روی سطح خاک است و بیشترین مقدار شوری را در پلایا دارد.

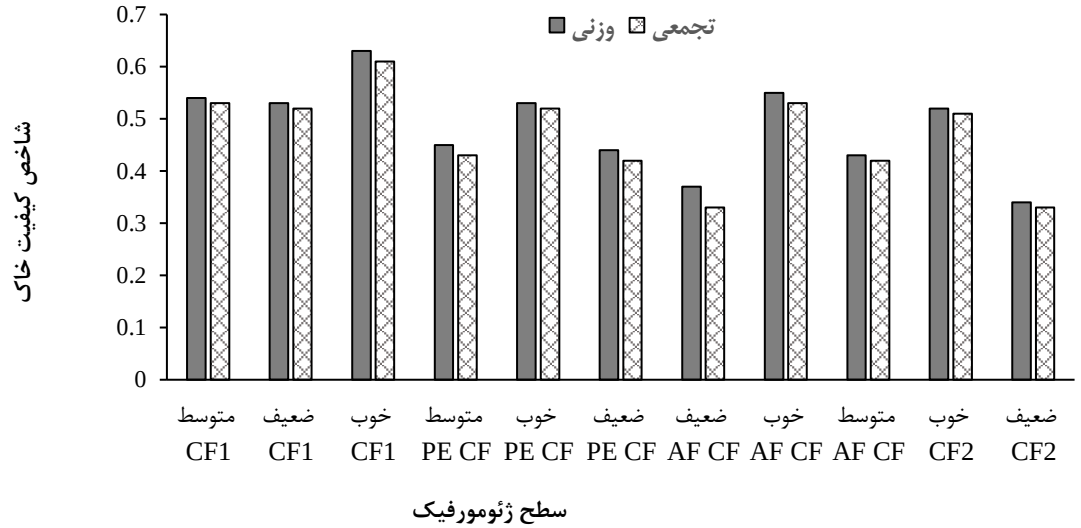
جدول ۸- کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ در باغ‌های پسته در مجموعه MDS

سطح ژئومورفیک	خاک‌رخ	سطح باغ	عملکرد	شاخص کیفیت خاک			
				خاک سطحی		خاک‌رخ	
				تجمع	وزنی	تجمعی	وزنی
کفه رسی غیر شور (Cf1)	p1	متوسط	۲۱/۵	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۵۴
	p2	ضعیف	۲۱/۹	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۳
	P3	خوب	۲۴/۵	۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۳
حد واسط مخروط‌افکنه و کفه غیرشور (Af-Cf)	P4	متوسط	۱۳/۲	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۴۵
	P5	خوب	۱۳/۶	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۳
	P6	ضعیف	۵/۲	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۴
حد واسط پدیمنت و کفه رسی شور (Pe-Cf)	P7	ضعیف	۵/۹	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۷
	P8	خوب	۲۲/۶	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۵
	P9	متوسط	۱۴/۴	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۳
کفه رسی شور (Cf2)	P10	خوب	۱۵/۴	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۲
	P11	ضعیف	۵/۶	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴
	P12	متوسط	۷/۴	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۴۳

مقامی و همکاران (۱۴۰۱) بیشترین کیفیت خاک سطحی در شاخص تجمعی و وزنی را به‌ترتیب مربوط به اراضی مرتعی به‌علت عدم کشت و کار و حفظ کربن آلی به نسبت اراضی کشاورزی و سامانه کل‌مالکی به‌علت بالا بودن بنیه اقتصادی و به‌کارگیری روش‌های اصولی و کارشناسی شده به نسبت سامانه خرده‌مالکی بیان کردند. واسو و همکاران (Vasu *et al.*, 2016) نیز با در نظر گرفتن هر دو ویژگی سطحی و خاک‌رخ، نتیجه گرفتند که استفاده از ویژگی‌های خاک‌رخ برای ارزیابی کیفیت خاک، مناسب‌تر است.



شکل۲- شاخص کیفیت خاک سطحی در سطوح مختلف ژئومورفیک و باغ‌های پسته

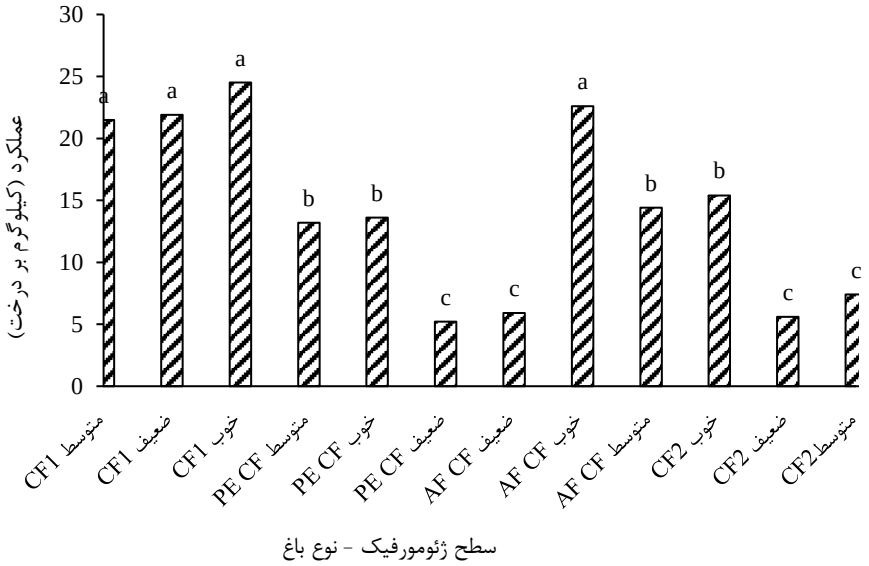


شکل۳- شاخص کیفیت خاک کل خاک‌رخ در سطوح مختلف ژئومورفیک و باغ‌های پسته

مقایسه میانگین آماری عملکرد (کیلوگرم برای هر درخت) درختان پسته در سطوح ژئومورفیک مختلف مورد مطالعه، نیز نشان داد که در سطح ژئومورفیک Cf1، بیشتر ویژگی‌ها، به‌خصوص میزان نیتروژن و پتاسیم، به‌عنوان عناصر ضروری برای عملکرد گیاه، برتری معنی‌داری نسبت به سایر نواحی دارند. سطح ژئومورفیک Cf2 با میانگین عملکرد ۹/۴۷ کیلوگرم برای هر درخت پسته، به‌خصوص در خاک‌رخ‌های شماره ۱۱ و ۱۲، با توجه به بالا بودن میزان قابلیت هدایت الکتریکی و مقدار بور، نسبت به ناحیه Cf1 با عملکرد ۲۲/۶۲ کیلوگرم برای هر درخت، ۵۸ درصد کاهش عملکرد نشان دادند. در حالی که در سطوح ژئومورفیک

Af-Cf و Pe-Cf به‌ترتیب با عملکرد ۱۰/۶۶ و ۱۴/۳۱ کیلوگرم برای هر درخت، تفاوت معنی‌داری نداشتند. تفاوت بیشترین و کمترین عملکرد، ۱۹/۳۴ کیلوگرم برای هر درخت بود که از باغ خوب در ناحیه Cf1 با عملکرد ۲۴/۵ تا باغ ضعیف در ناحیه Af-Cf با عملکرد ۵/۶ کیلوگرم برای هر درخت تغییر می‌کرد (شکل ۴).

با توجه به این‌که سطح مدیریت باغ‌ها یکسان بود و باغ‌ها براساس یک‌سری ویژگی‌های ظاهری و مورفولوژیکی به سه نوع خوب، متوسط و ضعیف تقسیم شدند، با توجه به جدول شماره ۸، خاک‌رخ شماره ۲ با نوع باغ ضعیف در سطح ژئومورفیک کفه غیرشور، شاخص کیفیت خاک و عملکرد بالاتری نسبت به خاک‌رخ شماره ۱۰ با نوع باغ خوب در سطح ژئومورفیک کفه شور دارد. تجمع زیاد نمک و بور در این سطح ژئومورفیک (Cf2 – p11)،کاهش تراکم و رشد ریشه، اندام هوایی درخت، غالب شدن یون سدیم و برهم-خوردن تعادل عناصر غذایی می‌تواند از علل احتمالی تفاوت عملکرد با سایر سطوح ژئومورفیک باشد (شکل ۴). این موضوع، مسلماً اثر سطح ژئومورفیک را بر فرآیندهای خاک‌سازی، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، به‌خصوص ویژگی‌های عمقی خاک، کیفیت خاک و در نهایت عملکرد محصول نشان می-دهد.

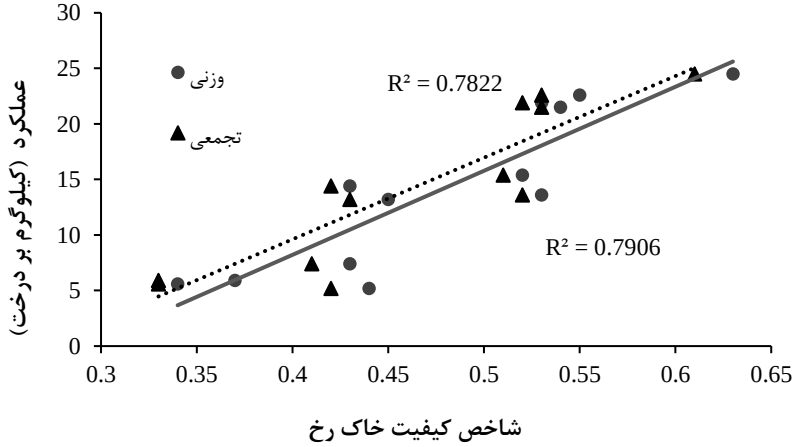


شکل ۴- مقایسه میانگین عملکرد باغ‌های مورد مطالعه در سطوح ژئومورفیک مختلف؛ حروف یکسان در نمودار نشان دهنده نبود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است.

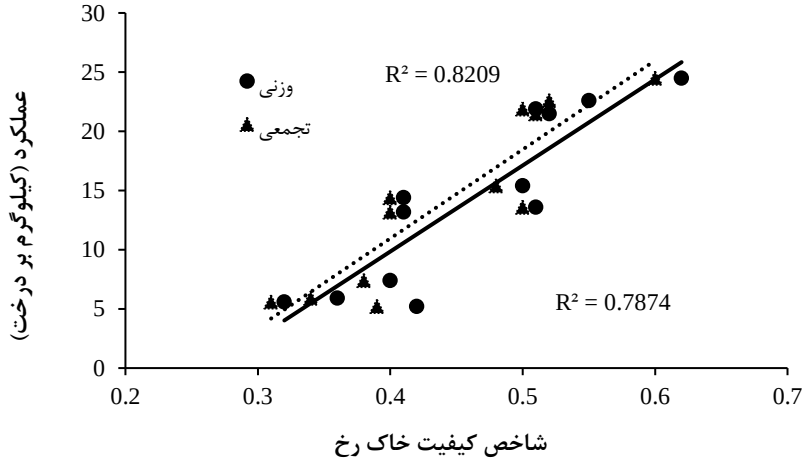
۳- ارتباط بین عملکرد و شاخص کیفیت خاک

شاخص کیفیت خاک وزنی در هر دو بخش لایه سطحی و خاک‌رخ، ارتباط بالایی با عملکرد داشتند و

در خاک‌رخ، این ارتباط اندکی قوی‌تر بود (شکل‌های ۵ و ۶). مقامی و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که شاخص وزنی کیفیت خاک‌رخ (روش ضریب وزنی) با عملکرد یونجه و کلزا در سامانه کل‌مالک شخصی و شرکت بینالود نیشابور، ارتباط بیشتری با عملکرد در مقایسه با لایه سطحی داشت. در این خصوص، واسو و همکاران (Vasu *et al.*, 2016) در هند، همبستگی شاخص کیفیت خاک با نخود را در مجموعه PCA و همبستگی شاخص وزنی و تجمعی کیفیت خاک با پنبه و ذرت را در هر دو بخش لایه سطحی و خاک‌رخ بیان کردند. لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2014) در بررسی کیفیت خاک اراضی شالیزاری چین نشان دادند که همبستگی معنی-دار شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج بیانگر این است که انتخاب ویژگی‌های خاک به‌عنوان MDS توانسته وضعیت خاک برای تولید برنج را به خوبی ارزیابی نماید. آن‌چه که در مطالعه حاضر مشخص شد این بود که شاخص کیفیت خاک به خوبی تأثیر ویژگی‌های خاک را بر عملکرد نشان داد. تفاوت اندک ارتباط کیفیت محاسبه شده در هر دو بخش با عملکرد پسته، به این دلیل می‌تواند باشد که ویژگی‌های خاک سطحی و خاک‌رخ، تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.



شکل ۵- رابطه رگرسیونی بین عملکرد درخت پسته و شاخص کیفیت خاک در کل خاک‌رخ



شکل ۶. رابطه رگرسیونی بین عملکرد درخت پسته و شاخص کیفیت خاک در لایه سطحی

نتیجه‌گیری

ارزیابی کیفیت خاک در منطقه مورد مطالعه با توجه به تنوعی که در سطوح ژئومورفیک و به تبع آن در ویژگی‌های خاک سطحی و خاک‌رخ داشت، نشان داد که شاخص کیفیت خاک فقط با استفاده از خصوصیات خاک سطحی، شاید نتواند اطلاعات کاملی را در اختیار کشاورزان و مدیران قرار دهد؛ ولی گنجاندن ویژگی‌های خاک‌رخ همراه با خصوصیات خاک سطحی برای مدیریت پایدار این‌گونه اراضی، به‌خصوص با توجه به اقلیم خشک منطقه، ضروری است. از آنجا که تراکم ریشه‌های پسته در عمق ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک است (مرکز تحقیقات ملی شوری، ۱۳۹۹)، ارزیابی تغییرات عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن و بور و همچنین وجود لایمه سخت و سنگریزه در عمق، برای رسیدن به عملکرد مطلوب ضروری می‌باشد.

تقسیم‌بندی باغ‌ها در این مطالعه براساس یکسری ویژگی‌های ظاهری و مورفولوژیکی همانند ارتفاع، قطر تنه درخت، تراکم شاخه‌ها، عملکرد و ... بوده است، ولی با توجه به تغییراتی که در عملکرد باغ‌ها (از ۹/۴۷ کیلوگرم برای هر درخت در باغ ضعیف در سطح کفه رسی شور تا ۲۲/۶۲ کیلوگرم برای هر درخت در باغ خوب کفه‌رسی غیرشور) به‌علت تغییر در ویژگی‌های خاک، به‌ویژه مقدار قابلیت هدایت الکتریکی، غلظت بور و درصد رس وجود داشت و از طرفی اثری که نوع سطح ژئومورفیک بر تغییرات ویژگی‌های خاک، به‌خصوص ویژگی‌های عمقی و نتایج ارزیابی شاخص کیفیت خاک داشت، به‌نظر می‌رسد که برای رسیدن به تولید پایدار پسته در این مناطق، حفظ و بهبود کیفیت خاک در کنار خیلی از عوامل مدیریتی و محیطی، شناخت محدودیت‌های خاکی و ارتباط آن با عملکرد باغ‌های پسته برای بهره‌وری مناسب و تولید بهینه ضروری باشد.

منابع

۱. حسینی‌فرد، ج، بصیرت، م، صداقتی، ن، و اخیانی، الف. ۱۳۹۶. *مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی در درختان پسته*. موسسه تحقیقات خاک و آب، پژهشکده پسته کشور، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی.

۲. صاحب‌جمع، ع. (۱۳۷۹). مطالعات خاکشناسی و طبقه بندی اراضی اجمالی دشت فیض آباد استان خراسان. موسسه تحقیقات خاک و آب. تهران. ایران.

۳. قاسم‌زاده گنجه‌ای، م. (۱۳۹۵). مطالعه تغییر و تحول خاک‌ها و تأثیربرخی ویژگی‌های خاک بر خصوصیات رشدی و عملکرد پسته در حاشیه پلایای بجستان. رساله دکتری علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد.

٤. مقامی مقیم، ف، کریمی، ع، باقری، م، و امامی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی نقش سامانه‌های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول (مطالعه موردی: دشت نیشابور). نشریه آب و خاک، ۳۶: ۱۱۲-۹۵.

٥. ملکوتی، مج. (۱۳۹۳). توصیه بهینه مصرف کود برای محصولات کشاورزی در ایران. *نشر مبلغان*، تهران، ۳۴۸ صفحه.

٦. همتی، س، یغمائیان مهابادی، ن، فرهنگی، م، و صبوری، ع. (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص های کیفیت خاک و ارتباط آن با عملکرد برنج در شالیزار های مرکزی استان گیلان. *مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۹: ۱۵۰-۱۳۵.

۷. مرکز تحقیقات ملی شوری. (۱۳۹۹). توزیع ریشه درختان بارور پسته و نقس آن در مدیریت آب و آبیاری و تغذیه باغ‌های پسته. نشریه ۵۵۲، وزات جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه آموزش و ترویج کشاورزی.

8. Andrews, SS, & Carroll, CR. (2001). Designing a soil quality assessment tool for sustainable agro-ecosystem management. *Ecological Applications, 11*, 1573-1585.
9. Andrews, SS, Karlen, DL, & Mitchell, JP. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 90*, 25-45.
10. Askari, MS, & Holden, NM. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Soil and Tillage Research, 150*, 57-67.
11. Boix-Fayos, C, Calvo-Cases, A, Imeson, AC, Soriano-Soto, MD, & Tiemessen, I.R. (1998). Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient. Catena, 33, 123-138.
12. Bünemann, EK, Bongiorno, G, Bai, Z, Creamer, RE, De Deyn, G, de Goede, R, Fleskens, L, Geissen, V, Kuyper, TW, Mäder, P, Pulleman, M, Sukkel, W, van Groenigen, JW, & Brussaard, L. (2018). Soil quality - A critical review, *Soil Biology and Biochemistry*. 120, 105-125.

13. Jones JB Jr. (2001) Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL
14. Karlen, DL, Mausbach, MJ, Doran, JW, Cline, RG, Harris, RF, & Schuman, GE. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61, 4 -10.
15. Keren, R. (1996). Boron. PP. 603-626. In: DL, Sparks et al. (eds.), Methods of Soil Analyses. Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series, No. 5, Madison, WI.
16. Liu, Z., Zhou, W, Shen, J, He, P, Lei, Q, & Liang, G. (2014). A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields south China. *Geoderma*, 235-236, 39-47.
17. Masto, R, Chhonkar, P, Singh, D, Patra, A. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 419–435.
18. Nelson, DW, & Sommers, LE. (1982). Total Carbon, Organic matter. PP. 539-577, In: AL, Page et al. (eds.), Method of Soil Analysis, Part 2. 2 nd ed., Agron. Monger. No. 9.ASA and SSSA. Madison, WI.
19. Olsen, SR, Sommers, LE. (1982). Phosphorus. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. *American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison*, 1035–1049.
20. Page, AL, Miller, RH, & Keeney, H. (1992). Method of Soil Analysis, Part 2, Am. Soc of Agron., Madison, WI.
21. Qi, Y, Jeremy, LD, Biao, H, Yongcun, Z, Weixia, S, & Zhiquan G. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149, 325-334.
22. Reynolds, WD, Drury, CF, Tan, CS, Fox, CA, & Yang, XM. (2009). Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252- 263.
23. Sys, C, Van- Ranst, E, Debaveye, J. (1991). Land evaluation, part I. Principles in Land Evaluation and Crop Production *Calculations. General administration for development cooperation, Brussels*, 40-80.
24. Tabatabai, MA. (1996). Sulfur. PP. 921-960, In: DL, Sparks et al. (eds.), Method of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods, Number 5 in the Soil Science Society of America Book Series, Soil Science Society of America, Inc.American Society of Agronomy, Inc.Madison, Wisconsin, USA.
25. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. Environmental indicators of water quality in the United States. United States Environmental Protection Agency, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
26. Vasu, D, Singh, SK, Ray, SK, Duraisami, VP, Tiwary, P, Chandran, Nimkar, AM, Shyam, M, & Anantwar, SG. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. Geoderma, 282, 70-79.
27. Waling, I, Vark, WV, Houba, VJG, & Van der lee, JJ. (1989). Soil and plant analysis, a seris of syllabi. Part 7. Plant analysis procedures. Wageningen agriculture university, Netherland.

Evaluation of Soil Quality Indice of Surface and Soil profile in Pistachio Orchards of Bajestan, Notheastern Iran

Mohammad Ghasemzadeh Ganjehie[1], Freshteh Maghami Moghim[2], Alireza Karimi[3*]

Abstract

Pistachio is one of the important export products, strategic and compatible with dry environments in Iran. The objective of this study was to evaluate the soil quality index of pistachio orchards at different geomorphic surface (no-saline clay flat, saline clay flat, intermediate alluvial fan- non-saline clay flat, intermediate pediment- saline clay flat) in two layers of soil surface (horizon A) and soil profile (0-150 cm), and its effect on pistachio yield in Bajestan playa. For this purpose, 12 soil profiles were investigated in different geomorphic surfaces. The soil physical and chemical properties of the soils were measured. The minimum data set (MDS) was determined by principal component analysis (PCA) method and the soil quality index was calculated by additive and weighted methods. The results showed that in good orchards, the weighted soil quality index was higher than the additive soil quality index both in surface and soil profile in all geomorphic surfaces. The soil quality index had the lowest value in saline clay flat geomorphic surface, both in surface soil and soil profile, due to the accumulation of soluble salts, high groundwater level and being in the margin of the salt crust. The weighted soil quality index showed a strong correlation with tree yield both in surface soil especially soil profile. Based on the results, it is necessary to improve the soil quality not only in the surface soil, but also in the deep layers, to achieve the desired and sustainable yield of pistachi in the region.

Keywords: Geomorphic surface, Pistachio yield, Principal component analysis, Soil quality index

1. Associate Professors, Soil and Water Research Department, Khorassan Rzavi Agricultural and Natural Resources Research and Eduacation Center, Agricultural Research Education and Extention Organization (AREEO), Mashhad, Iran

2 . PhD Student of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3 . Professors of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

* Corresponding Author Email: karimi-a@um.ac.ir