پایش و ارزیابی مشخصه‌های شیمیایی- زیستی و تعیین شاخص کمی کیفیت خاک بادامستان‌های چهارمحال و بختیاری

سمیه قاسمی پیربلوطی[۱] و صاحب سودائی مشائی[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۷)

چکیده

از آنجا که پایداری طولانی مدت اکوسیستم‌های باغی وابسته به‌حفظ کیفیت خاک است، آگاهی از وضعیت خاک‌ها و بررسی آثار فعالیت‌های صورت گرفته بر خصوصیات خاک بسیار مهم و در مدیریت بوم نظام مؤثر است. به‌منظور بررسی شاخص کیفیت خاک باغات بادام (*Prunus dulcis*) تحت شیوه‌های مختلف مدیریت شده استان چهارمحال و بختیاری، ۴۰ نمونه خاک مرکب از سه نقطه در هر باغ برداشت شد و نهایتاً به ۶ گروه (سامان، بن، شهرکرد، کیار، اردل و فارسان) طبقه‌بندی شدند. برای تعیین شاخص کیفیت خاک، ویژگی خاک شامل pH، EC، کربن آلی کل و محلول در آب، تنفس پایه و ناشی از بستره، جمعیت میکروبی ریزوسفر، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نحوه مدیریت باغات بادام در مناطق مختلف بر روی ویژگی‌های خاک و فرایندهای ارزیابی شده در این مطالعه تأثیر گذاشت. پایش خصوصیات خاک نشان داد که pH بین ۷/۰۵ تا ۸/۴۸ EC بین ۰/۲۳ تا ۲/۹۱ دسی‌زیمنس بر متر، تنفس میکروبی بین ۰/۴۴ تا ۸/۵۷ میلی‌گرم CO_2 در ۱۰۰ گرم خاک در روز، کربن آلی ۲/۰۹ تا ۴۴/۷۹ گرم بر کیلوگرم، فسفر قابل دسترس بین ۱/۵ تا ۱۲۲/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پتاسیم قابل دسترس بین ۹۱/۲ تا ۳۰۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. اجزای شاخص کیفیت خاک شامل جزء شیمیایی، فعالیت میکربی، جمعیت میکروبی و کربن آلی خاک تعیین شد. سهم شوری خاک در کیفیت خاک، به‌دست آمده با استفاده از تجزیه عاملی، بالاترین (۳۱ ٪) بود و پس از آن ضریب معدنی شدن کربن میکروبی (۲۷ ٪)، جمعیت میکروبی ریزوسفری (۲۴ ٪) و کربن آلی محلول در آب (۱۸ ٪) بود. مقادیر شاخص کیفیت خاک برای باغ‌های بادام سامان، بن، شهرکرد، کیار، اردل و فارسان به‌ترتیب ۰/۴۶، ۰/۴۰، ۰/۵۱، ۰/۶۷، ۰/۵۴ و ۰/۳۷ بود. این مقادیر نشان می‌دهند که خاک‌های ارزیابی شده برای تولید بادام در شهرکرد، کیار و اردل مناسب هستند و برای سامان، بن و فارسان نیاز به اقدامات مدیریتی جدی برای بهبود کیفیت خاک و افزایش پایداری این اکوسیستم‌های کشاورزی وجود دارد..

واژه‌های کلیدی: بادام، پایداری کشاورزی، سلامت خاک، ماده آلی خاک، همزیستی میکوریزی

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران.
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: soodaie@sku.ac.ir

مقدمه

بادام (*Prunus amygdalis* var. dulcis) درختی است از خانواده Rosaceae که دانشمندان گیاه‌شناسی، موطن اصلی آن را به ایران نسبت می‌دهند و یکی از مهم‌ترین محصولات باغی کشور است که به علت داشتن ویژگی‌های منحصربه فرد از جمله کارایی بالا در مصرف آب و تولید میوه، نقطه اشباع نوری بالا، منحنی خاص رشد میوه، وجود خاصیت تطابق اسمزی در برگ‌ها، مورفولوژی ویژه برگ و میوه و سیستم ریشه‌ای قوی و عمودی می‌تواند در شرایط نامساعد خاک به حیات خود ادامه دهد (۱۶ و ۲۰). بادام، یک ماده خام صنعتی با ارزش، در بسیاری از نقاط جهان رشد می‌کند و به‌عنوان آجیل خشک مصرف می‌شود و به‌دلیل سازگاری آسان با اقلیم خشک و شرایط نامساعد خاک، تقاضا برای کشت بادام روز به روز درحال افزایش است (۳۲).

درک تنوع خاک در مقیاس‌های چندگانه برای مدل‌سازی فرایندهای بیوژئوشیمیایی، برنامه‌ریزی عاقلانه کاربری زمین، شیوه‌های مدیریت کشاورزی دقیق و نظارت بر پایداری منابع خاک ضروری است (۴۹). هنگامی که سایر عوامل تشکیل دهنده خاک، مانند پوشش گیاهی، آب و هوا و مواد اولیه مشابه هستند، بهره‌وری محصول، مدیریت اراضی و متغیرهای منظر، عواملی مهمی هستند که تغییرپذیری فضایی ویژگی‌های خاک را تعیین می‌کنند (۳). خصوصیات خاک، به‌طور مکانی و زمانی تغییر می‌کنند. بیشتر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تحت تأثیر عواملی مانند گیاهان، انسان‌ها، حیوانات، میکروارگانیسم‌ها، اقلیم و شرایط توپوگرافی قرار می‌گیرند و دچار تغییر می‌شوند. وضعیت خاک را می‌توان با بررسی تغییر خصوصیات آن، که ممکن است ناشی از تأثیر متقابل خصوصیات خاک و عوامل محیطی باشد تشخیص داد (۶). خاک، علاوه بر تولید مواد غذایی و فیبر، دارای عملکردهای مهم زیست محیطی از جمله ارائه خدمات اکوسیستم، زیستگاه و حمایت از تنوع زیستی است (۴۸). پایش کیفیت خاک از جمله مطالعاتی است که بدنبال آگاهی یافتن از تغییرات ویژگی‌های خاک مرتبط با وظایف و عملکرد خاک است. برای برنامه پایش خاک مهم‌ترین هدف، حفظ کیفیت خاک است چرا که کیفیت خاک نقش حیاتی را در حفظ باروری دائم خاک، حفظ محیط زیست (کیفیت آب، هوا و تنوع زیستی) و تولید محصولات غذایی سالم و مغذی دارد پایش با هدف ایجاد سامانه‌ای برای پیش آگاهی، به حداقل رساندن ریسک در تصمیم‌گیری و افزایش درک فرایندهای بیوفیزیکی انجام می‌گیرید (۱۷). رشد بی‌رویه جمعیت نیازمند تأمین مواد غذایی برای انسان و دام‌ها و در نتیجه بهره‌برداری بیشتر از منابع طبیعی است. این موضوع مهم‌ترین علت گرایش به کشاورزی با نهاده‌های بیشتر و تغییر کاربری اراضی است (۲۱). تغییر کاربری بوم‌نظام‌های طبیعی به بوم نظام مدیریت شده، آثار زیانباری بر ویژگی‌های خاک دارد. تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی (که در استان مورد مطالعه به شدت رخ داده است) سبب تخریب یا اخلال در بوم‌نظام‌های طبیعی و کاهش ظرفیت تولید فعلی یا آینده خاک به‌دلیل فرسایش، کاهش حاصلخیزی، تغییر رطوبت خاک و تغییر در فلور و فون خاک می‌شود (۹). بنابراین ایجاد یک برنامه کیفیت خاک، برای اهداف نظارت بر محیط زیست و کمک به شناسایی و حذف محدودیت‌های خاک برای تولید بادام اهمیت دارد.

کیفیت خاک بر ظرفیت آن در حفظ و تداوم حاصلخیزی زیستی، حفظ کیفیت زیست محیطی و افزایش سلامتی گیاه، انسان و حیوان دلالت دارد. مدیریت اراضی با درجه‌های مختلف بر کیفیت خاک مؤثر بوده و هرگونه مدیریت نادرست می‌تواند منجر به تخریب کیفیت خاک شود. ارزیابی کیفیت خاک ابزاری است که مدیران می‌توانند از آن برای بررسی مشکلات خاک در کوتاه مدت استفاده نمایند و راهکارهای مدیریتی مناسبی را برای حفظ کیفیت خاک در بلندمدت اتخاذ نمایند (۲۸). کیفیت خاک به‌صورت کمی ترکیبی از خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در یک شاخص واحد برای ارزیابی منابع خاک و پایداری خاک و شیوه‌های مدیریت

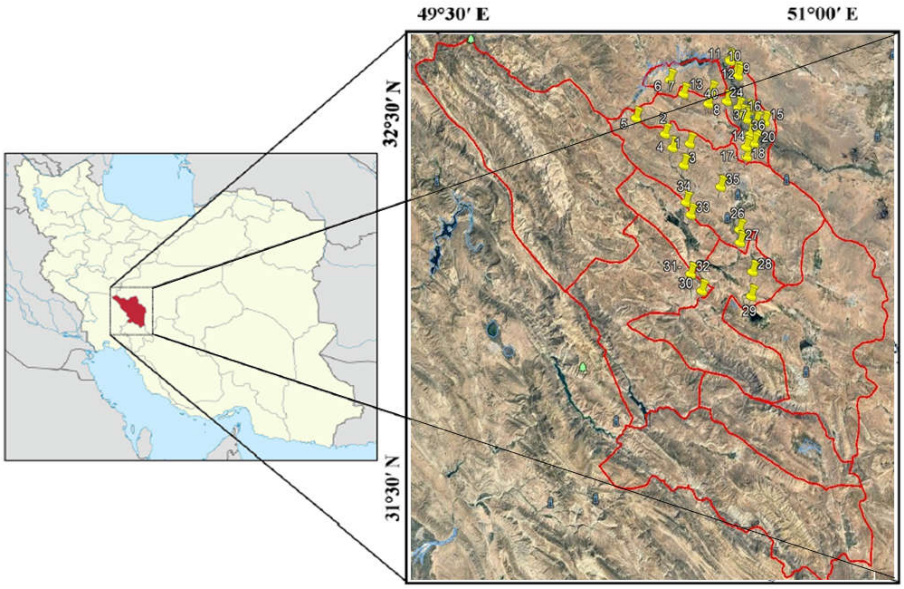
محصول ادغام می‌کند (۳۶). این مفهوم می‌تواند به‌عنوان معیاری برای عملکردهای خاک مرتبط با اهداف مدیریتی مختلف از جمله بهره‌وری محصول، حفظ و چرخه مواد غذایی و حفظ تنوع زیستی مورد استفاده قرار گیرد (۷).

بیشتر پژوهش‌ها به جای شاخص‌های زیستی که عموماً اندازه‌گیری آن‌ها دشوارتر است، بر شاخص‌های شیمیایی و فیزیکی کیفیت خاک تمرکز می‌کنند، درحالی که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تعیین کننده‌های مهم کیفیت خاک هستند، بسیاری از فرایندهای خاک توسط بیوتای خاک هدایت می‌شوند (۳۹ و ۳۸). اگرچه درک سازوکار روابط بین تنوع زیستی و عملکرد خاک بسیار پیچیده و مبهم است، اندازه‌گیری مستقیم برخی از ویژگی‌های زیستی و موجودات خاک می‌تواند به فرایندهایی مانند تجزیه مواد آلی مرتبط باشد (۳۰). هنگامی که یک خاک برای کشاورزی استفاده می‌شود، دچار یک سری تغییرات فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی می‌شود که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تغییراتی است که بر میکروارگانیسم‌های ساکن ریشه تأثیر می‌گذارد. قارچ‌های میکوریزا آربسکولار (AM) نقش مهمی در احیای خاک‌های خشک دارند و همزیستی آن‌ها با گونه‌های گیاهی نشان داده شد که جذب عناصر غذایی و آب توسط گیاهان را بهبود می‌بخشند (۲۳). با این حال، خاک یک منبع کمیاب است که در سراسر جهان در معرض خطر است. به‌عنوان مثال، کشت معمولی درختان اغلب باعث تخریب خاک با تخلیه مواد آلی خاک (SOM)، فرسایش، و در باغات آبی، باعث آلودگی خاک و آب می‌شود (۱۵). علاوه بر این، آداب و رسوم محلی منجر به اعمال خاک‌ورزی فشرده و حذف محصولات پوششی می‌شود. بنابراین، شیوه‌های کشاورزی همیشه باید کیفیت خاک را در نظر بگیرند تا پایداری آن‌ها افزایش یابد (۱۰). تاکنون مطالعه مشابهی در استان صورت نگرفته است. بنابراین، هدف از این پژوهش، تعیین شاخص کیفیت خاک برای ارزیابی وضعیت کیفیت خاک بر اساس خواص شیمیایی و زیستی بادامستان‌های استان چهارمحال و بختیاری بود. سوال اصلی پژوهش این است که چگونه و تا چه حد مدیریت باغات بادام (استفاده از نهاده‌های آلی و شیمیایی) در مناطق مختلف بر کیفیت خاک در اکوسیستم‌های باغی نیمه خشک، به‌ویژه عملکردهای میکروبی و بیوشیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد. ارزیابی کمی کیفیت خاک پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع خواهد داشت و ممکن است هم برای بهره‌برداران باغ و هم برای سیاست‌گذاران برای ارزیابی پایدار شیوه‌های مدیریت باغ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد.

مواد و روش‌ها

چگونگی و جایگاه نمونه‌برداری خاک و آماده‌سازی آن

برای انجام این پژوهش، نمونه خاک از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری تاج‌پوشش درختان بادام به همراه ریشه گیاه از بادامستان‌های شهرستان‌های سامان، بن، شهرکرد، کیار، اردل و فارسان، به روش مرکب برداشته شد. جایگاه نمونه‌برداری دارای اقلیم نیمه خشک سرد تا سرد مرطوب نیمه مرتفع (۴۴) با بارندگی سالیانه ۳۸۰- ۵۶۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۰/۵ - ۱۱/۶ درجه سلسیوس است. خاک‌های منطقه مورد مطالعه از رسوبات مادری آهکی گرفته شده و به‌طور کلی طبق طبقه‌بندی خاک فائو به‌عنوان هاپلیک کلسی‌سول (Haplic Calcisols) طبقه‌بندی می‌شود (۳۵). همه ۴۰ نقطه نمونه‌برداری با دستگاه GPS مکان‌یابی شدند و روی نقشه پیاده‌سازی شد (شکل ۱). از خاک برداشت شده مقداری به همراه ریشه برای مشاهده و تعیین درصد کلنیزاسیون همزیستی قارچ-ریشه (میکوریزایی) استفاده شد و برای تعیین ویژگی‌های میکروبی و زیستی مقداری از خاک در یخچال دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شد. برای تعیین ویژگی‌های شیمیایی هم مقداری دیگر از نمونه‌های خاک هوا خشک شد و از الک ۲ میلی‌متری گذر داده شد. خاک‌های نمونه‌برداری شده بر اساس منطقه و شهرستان نمونه‌برداری شده به ۶ گروه (سامان- بن- شهرکرد- کیار- اردل- فارسان) تقسیم‌بندی شدند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و باغستان‌های بادام منتخب با تمرکز بیشتر واقع در شمال غربی استان

بررسی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

ویژگی‌های خاک از قبیل قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۵ خاک به آب به کمک دستگاه هدایت‌سنج در دمای ۲۵ درجه سلسیوس (۳۷)، pH در سوسپانسیون ۱:۵ خاک به آب به کمک دستگاه pH متر (۴۷) اندازه‌گیری شد، فسفر قابل دسترس خاک به روش رنگ‌سنجی (آمونیم مولیبدات) و با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر و پتاسیم قابل دسترس به روش طیف سنجی شعله‌ای (۴۵ و ۱۱) اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری کربن آلی خاک، به روش اکسیداسیون تر انجام گرفت (۳۱). برای جداسازی ماده آلی محلول در آب نمونه‌های خاک، ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر به ۱۵ گرم خاک (۱۰: ۱ خاک و آب) افزوده شد و نمونه‌ها نیم ساعت تکان داده شد. پس از آن نمونه‌ها برای ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ شده (۵۰۰۰ دور در دقیقه) و از کاغذ صافی گذرانده شد و اندازه کربن آلی عصاره (کربن محلول در آب سرد) اندازه‌گیری شد (۱۴). تنفس میکروبی پایه و ناشی از بستره به روش آلف و نانی‌پیری (۱) اندازه‌گیری شد. برای تعیین جمعیت میکروبی ریزوسفر (R) بر اساس سری رقت ۱۰ تایی، با روش کشت روی محیط جامد (Spread plate) انجام شد (۳۳) و بر اساس واحدهای تشکیل دهنده کلنی (CFU) بعد از ۵ روز انکوباسیون در دمای ۲۸ درجه سلسیوس گزارش شد. نسبت جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفری به خاک غیر ریزوسفری (R/S) هم محاسبه شد (۱۹). برای رنگ آمیزی ریشه میکوریزایی از روش مک‌گونیل و همکاران (۲۵) استفاده شد، و درصد کلنیزاسیون با روش خطوط متقاطع محاسبه شد (۱۲).

تعیین شاخص کیفیت خاک (SQI)

شاخص کیفیت کلی خاک برای باغات مختلف بادام با انتخاب شاخص‌هایی به‌عنوان مجموعه داده‌های حداقل با تجزیه و تحلیل عاملی و تحلیل همبستگی چندگانه، تفسیر و تبدیل شاخص‌های انتخاب شده به امتیاز (۰ تا ۱) با استفاده از توابع خطی و ادغام شاخص‌های امتیازدهی شده در یک مقدار شاخص واحد و محاسبه شاخص کیفیت خاک وزنی (۳۵) انجام شد. خصوصیات خاک در بین خاک باغات مختلف بادام به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) متفاوت بود. ابتدا، خصوصیات حساس خاک تحت تحلیل عاملی با استفاده از چرخش واریماکس (varimax rotation) با معیار استانداردسازی (normalization criteria) کایزر برای کاهش داده‌ها قرار گرفت. مؤلفه‌هایی با مقادیر ویژه (EV) بیشتر از

یک و متغیرهای خاک با بار عاملی (factor loadings) بیش از ۰/۶۰ به‌عنوان شاخص‌هایی درنظر گرفته شدند که به بهترین وجه کیفیت خاک باغات را نشان می‌دهند. از توابع خطی استاندارد برای تبدیل و استانداردسازی شاخص‌های خاک استفاده شد. بنابراین نمره‌دهی خطی (LS) با تقسیم مقدار هر مشاهده به بالاترین مقدار مشاهده به‌دست آمد به‌طوری که بالاترین مقدار مشاهده شده امتیاز یک دریافت کرد (۲۴). وزن نرمال شده (Wi) هر شاخص انتخابی از مجموعه داده‌ها با تقسیم درصد تغییرات (واریانس) نشان داده شده توسط هر عامل (Vi) بر درصد کل تغییرات (واریانس) نشان داده شده توسط عوامل استخراج شده محاسبه شد (۳۵): مقادیر شاخص کیفیت خاک خطی محاسبه شد و سپس برای به‌دست آوردن حداکثر شاخص کیفیت خاک با استفاده از معادله وزنی زیر نرمال شد:

$$SQI = \sum_{n=1}^{n} Wi \times LSi \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱) Wi وزن نرمال شده (۰-۱) حاصل از تحلیل عاملی شاخص‌های انتخاب شده را نشان می‌دهد، LSi نمره خطی و n تعداد شاخص‌ها در مجموعه داده‌ها است.

تجزیه و تحلیل آماری

پس از بررسی فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و نرمال بودن باقیمانده‌ها، اثر عوامل تغییرات خاک‌ها بر شاخص‌های شیمیایی و زیستی خاک با استفاده از تجزیه واریانس بررسی شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش دانکن در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS (v. 23) انجام شد. به‌منظور نشان دادن همبستگی صفات و تعیین مهم‌ترین صفات، مقادیر خاص با نرم‌افزار GraphPad Prism 9.5.1 استخراج شد. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی بای پلات (PCA) برای نشان دادن همبستگی بین صفات و مشارکت در مؤلفه‌های اصلی تولید شد. افراد (بر اساس رنگ مشخص) و متغیرها بر اساس سهم آن‌ها در مؤلفه‌های اصلی گروه‌بندی شدند (۳۶).

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک‌ها

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده خاک در باغات بادام در جدول ۱ نشان داده شد. از بین عوامل شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شده درصد کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ مایکوریزا، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، تنفس پایه (MR)، تنفس خاک ناشی از بستره (SIR)، کربن آلی، ضریب معدنی شدن کربن میکروبی (minC)، فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک در سطح احتمال یک درصد و ویژگی‌های واکنش خاک (pH)، کربن آلی محلول در آب سرد، جمعیت میکروبی محیط ریشه (CFU) و نسبت R/S در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری را نشان دادند. پایش خصوصیات خاک از کل نمونه‌های خاک برداشت شده نشان داد که درصد کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریزا بین صفر تا ۳۳ درصد، pH در دامنه‌ای بین ۷/۰۵ تا ۸/۴۸، EC1:5 بین ۰/۲۳ تا ۲/۹۱ دسی‌زیمنس بر متر، تنفس میکروبی بین ۰/۴۴ تا ۸/۵۷ میلی‌گرم CO2 در ۱۰۰ گرم خاک در روز، کربن آلی ۲/۰۹ تا ۴۴/۷۹ گرم بر کیلوگرم، فسفر قابل دسترس بین ۱/۵ تا ۱۲۲/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، پتاسیم قابل دسترس بین ۹۱/۲ تا ۳۰۳۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر بین ۱/۱۲×۱۰۷ تا ۱/۵۴×۱۰۹ (CFU.g-1) و نسبت جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفری به خاک غیر ریزوسفری (R/S) بین ۱/۱۳ تا ۱۵۸/۷ بود.

نتایج نشان داد که نحوه مدیریت باغات بادام در مناطق مختلف استان بر روی ویژگی‌های خاک و فرایندهای ارزیابی شده در این مطالعه تأثیر گذاشت (جدول ۲). بیشترین کلنیزاسیون ریشه بادام توسط قارچ‌های همزیست میکوریزایی در منطقه سامان (گروه I) به‌طور متوسط ۲۰/۹ درصد و کمترین در شهرکرد (گروه III) با متوسط ۷/۰ درصد مشاهده شد. در بین نمونه‌های مختلف ریشه بادام در مناطق نمونه برداری حدود ۶۵ درصد از نمونه‌ها همزیستی میکوریزایی را نشان دادند. تفاوت در درجه کلنیزاسیون ریشه می‌تواند به‌دلیل سیستم ریشه‌ای، سرعت رشد

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات اندازه‌گیری شده خاک‌های نمونه‌برداری شده از باغات بادام

متغیرها	تیمار نوع خاک	خطا آزمایش	C.V. (درصد)	R2 مدل (درصد)
درجه آزادی (df)	۵	۱۱۴	—	—
درصد کلنیزاسیون ریشه	۴/۵۲**	۰/۸۴۵	۵/۹۴	۰/۸۹
pH (۱:۵ آب به خاک)	۲/۷۰*	۰/۹۲۵	۱۲/۶۹	۰/۹۷
EC (۱:۵ آب به خاک)	۱۰/۶۴**	۰/۵۷۷	۹/۴۵	۰/۹۶
تنفس پایه خاک	۶/۰۹**	۰/۷۷۷	۱۳/۹۰	۰/۷۹
تنفس ناشی از بستره	۱۱/۲۹**	۰/۵۴۸	۵/۹۶	۰/۸۸
کربن آلی کل	۳/۴۵**	۰/۸۹۳	۵/۲۰	۰/۷۸
کربن آلی محلول در آب سرد	۲/۵۶*	۰/۰۹۳	۲۲/۱	۰/۷۵
ضریب معدنی شدن کربن میکروبی	۴/۷۳**	۰/۸۳۶	۵/۹۳	۰/۷۲
جمعیت میکروبی محیط ریشه	۲/۰۶*	۰/۹۵۳	۱۲/۰۵	۰/۸۸
▪نسبت R/S	۲/۷۳*	۰/۹۲۴	۳/۲۱	۰/۷۸
فسفر قابل دسترس خاک	۳/۰۶**	۰/۹۱۰	۳/۵	۰/۶۹
پتاسیم قابل دسترس خاک	۹/۵۳**	۰/۶۲۶	۵/۸۰	۰/۸۷

ns، *، ** به‌ترتیب، غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

▪نسبت جمعیت میکروبی در خاک ریزوسفری به خاک غیر ریزوسفری (R/S)

جدول۲. نتایج مقایسه میانگین اثر منطقه نمونه‌برداری خاک (گروه‌بندی خاک‌ها) بر ویژگی‌های خاک در استان چهارمحال و بختیاری

ویژگی‌های خاک	گروه I (سامان)	گروه II (بن)	گروه III (شهرکرد)	گروه IV (کیار)	گروه V (اردل)	گروه VI (فارسان)
کلنیزاسیون میکوریزی ریشه (٪)	۲۰/۹۴^{a}	۱۲/۱۴^{ab}	۷/۰۰^{b}	۱۴/۶۶^{ab}	۱۳/۰۰^{ab}	۱۸/۰۰^{ab}
pH (۱:۵ آب به خاک)	۷/۵۱^{b}	۷/۵۷^{b}	۷/۶۶^{b}	۷/۵۳^{b}	۷/۶۶^{b}	۷/۶۷^{a}
EC (۱:۵ آب به خاک)	۰/۸۱^{b}	۰/۵۹^{b}	۰/۶۶^{b}	۲/۱۴^{a}	۰/۸۲^{b}	۰/۶۳^{b}
تنفس پایه خاک ($mg\ CO_2.100g^{-1}.day^{-1}$)	۲/۲۹^{bc}	۱/۴۳^{c}	۳/۳۳^{ab}	۴/۶۴^{a}	۳/۵۸^{ab}	۱/۴۱^{c}
تنفس ناشی از بستره ($mg\ CO_2.100g^{-1}.day^{-1}$)	۱۰/۵۹^{c}	۹/۲۱^{c}	۱۳/۰۸^{bc}	۲۵/۰۳^{a}	۱۶/۹۹^{b}	۱۳/۴۲^{bc}
کربن آلی کل (g/Kg)	۱۷/۷۲^{bc}	۱۷/۰۴^{c}	۱۵/۵۹^{c}	۲۴/۶۰^{a}	۲۴/۰۹^{ab}	۱۷/۴۶^{bc}
کربن آلی محلول در آب سرد (g/Kg)	۰/۹۴۱^{a}	۰/۸۷۷^{a}	۱/۰۷^{a}	۰/۸۹۱^{a}	۱/۱۷^{a}	۰/۳۵۰^{b}
ضریب معدنی شدن کربن میکروبی	۰/۱۴۱^{ab}	۰/۰۹۸^{b}	۰/۲۲۱^{a}	۰/۲۲۶^{a}	۰/۱۴۴^{ab}	۰/۰۶۷^{b}
جمعیت میکروبی محیط ریشه (CFU/g)	۱/۲۲×۱۰^۸^{ab}	۰/۸۵×۱۰^۸^{b}	۱/۰۴×۱۰^۸^{b}	۱/۷۶×۱۰^۸^{ab}	۴/۸۸×۱۰^۸^{a}	۲/۱۴×۱۰^۸^{ab}
نسبت R/S	۳۶/۶۳^{ab}	۱۶/۸۰^{b}	۲۱/۳۹^{b}	۲۰/۹۲^{b}	۵۵/۷۳^{a}	۲۲/۳۰^{b}
فسفر قابل دسترس خاک (mg/Kg)	۳۴/۲۰^{a}	۳۶/۵۱^{a}	۹/۷۵^{b}	۲۳/۱۱^{ab}	۱۸/۱۲^{ab}	۱۵/۴۱^{ab}
پتاسیم قابل دسترس خاک (mg/Kg)	۳۰۲/۹^{b}	۳۸۷/۷^{b}	۲۸۷/۸^{b}	۱۴۳۹^{a}	۳۰۴/۳^{b}	۱۵۴/۶^{b}

* میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ردیف، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد هستند.

ریشه، حاصلخیزی خاک و میزان فسفر قابل دسترس باشد (محمدی و رجالی، ۱۴۰۰). امکان برقراری همزیستی درختان بادام با قارچ میکوریزا آربسکولار (گونه *Funneliformiss mosseae*) توسط رولدان- فاگاردو همکاران (۴۰) گزارش شد که این گونه قادر است ۵۳ درصد و گونه بومی خاک‌های اسپانیا حداکثر ۶۱ درصد ریشه درخت بادام وحشی را کلنیزه نمایند. بیشترین واکنش خاک (pH) در گروه VI (فارسان) و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) در گروه IV (کیار) برابر ۲/۱۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۲). با گزارش گراتتان (۱۳)، بادام در زمره درختان میوه حساس به شوری قرار دارد به‌طوری که در شوری آب ۲/۸ دسی‌زیمنس بر متر، ۵۰ درصد کاهش پتانسیل تولید را به همراه دارد. به گزارش وسلی و همکاران (۵۱) شوری آستانه برای بادم ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شیب کاهش محصول به ازای هر واحد افزایش EC برابر با ۱۹ درصد است، به‌طوری که در EC_e برابر با ۲/۸ دسی‌زیمنس بر متر بادام ۲۵ درصد کاهش پتانسیل تولید دارد. تنفس پایه و ناشی از بستره در خاک به‌ترتیب ۴/۶ و ۲۵/۰ میلی‌گرم CO_2 در ۱۰۰ گرم خاک در روز در گروه IV (کیار) مشاهده شد (جدول ۲) که با بقیه گروه‌ها تفاوت معنی‌داری از لحاظ آماری نشان داد. تنفس میکروبی خاک یکی از شاخص‌های مهم برای پی بردن به فعالیت جمعیت عمومی میکروبی خاک است که بیان‌گر روند و چگونگی تجزیه مواد آلی، فعالیت آنزیمی و چرخه برخی عناصر غذایی خاک است و تنفس ناشی از بستره جمعیت جوان، فعال و زنده میکروبی خاک را نشان می‌دهد (۵۳). کربن آلی کل (۲۴/۶ گرم بر کیلوگرم) در گروه IV (کیار) و کربن آلی محلول در آب سرد (۱/۱۷ گرم بر کیلوگرم) در گروه V (اردل) بیشینه بود (جدول ۲). ذخیره ماده آلی خاک سازنده بخش واکنش‌دهنده خاک است که شامل کربن قابل معدنی شدن، کربن زیتوده ریزجانداران، کربن محلول، مواد آلی دانه‌ای و تجزیه نشده یا با تجزیه‌پذیری کم است. کربن محلول نیز کربنی است که با یون‌های معدنی ترکیب شده است (۴۳). کربن آلی خاک، مهم‌ترین شاخص کیفیت خاک برای نقش‌های چندگانه آن در سیستم خاک است، که شامل تأثیر بر تخلخل خاک، پایداری ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب، ظرفیت نفوذ آب، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، چرخه، حفظ و فراهمی عناصر غذایی است، بنابراین، مستقیماً بر حاصلخیزی خاک تأثیر می‌گذارد (۳۵). جمعیت میکروبی محیط ریشه و نسبت جمعیت میکروبی ریزوسفر به محیط غیرریزوسفری (R/S) در گروه V (اردل) بیشتر بود (جدول ۲) که با افزایش کربن محلول در آب همخوانی دارد که تأیید می‌کند که این بخش از کربن، یک منبع کربن در دسترس برای ریزجانداران است. ریشه گیاه تأثیر زیادی بر جمعیت میکروبی خاک دارد. اثر ریزوسفری عمدتاً به ماهیت و مقدار تراوشات و ته‌نشست‌های ریشه‌ای بستگی دارد که به نظر می‌رسد تحت تأثیر سن گیاه، نوع گونه‌ها و عوامل خاکی و اقلیمی باشد. نسبت R/S که مبتنی بر تحرک جمعیت‌های میکروبی نسبتاً شدید در ناحیه ریزوسفر در مقابل توده خاک است، برای باکتری‌ها، معمولاً از ۵ تا ۲۰ و گاهی تا ۱۰۰ (برای باکتری‌های استراتژی r) متغیر است (۳۴). علاوه بر این، نسبت R/S معیاری برای ارزیابی سلامت کلی گیاهان است، و زمانی که گیاهان تحت تنش مواد مغذی هستند این نسبت افزایش می‌یابد، زیرا گیاهان منابع بیشتری را برای افزایش کسب منابع محدودکننده اختصاص می‌دهند و نسبت R/S در شرایط کافی منابع غذایی کاهش می‌یابد (۴۶). بیشترین مقادیر فسفر و پتاسیم قابل دسترس گیاه به‌ترتیب در گروه II (بن) برابر ۳۶/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و گروه IV (کیار) برابر ۱۴۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهد شد. مقادیر بالای فسفر و پتاسیم نشان از مصرف کودهای شیمیایی در مدیریت باغات بادام استان را دارد. فسفر و پتاسیم عناصر ضروری و حیاتی برای رشد گیاه هستند. مصرف نهاده‌های شیمیایی یا آلی و یا مصرف توام آن‌ها در مناطق مختلف برای باغ‌های بادام متفاوت است و برخی باغداران صرفاً از کودهای آلی استفاده می‌کنند.

همبستگی خطی بین صفات

ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که (جدول ۳) درصد کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریز با قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک و میزان فسفر قابل دسترس همبستگی مثبت، قوی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p\leq0.01$) داشت و با کربن آلی خاک، ضریب معدنی شدن کربن میکروبی، جمعیت میکروبی ریزوسفر، نسبت R/S و میزان پتاسیم قابل دسترس خاک همبستگی معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p\leq0.01$) نشان داد. نتایج نشان داد که همزیستی میکوریزی بادام می‌تواند به شدت تحت تأثیر شوری خاک و میزان فسفر قابل دسترس خاک باشد. عوامل محیطی زیادی شامل نور، درجه حرارت، رطوبت، مقدار ماده آلی، واکنش خاک، شوری، نوع خاک، عناصر غذایی و جمعیت میکروبی بر شدت و نوع رابطه همزیستی قارچ با گیاه میزبان تأثیرگذارند. برخی محققان نشان دادند که همراه با افزایش شوری، درصد کلنیزاسیون نیز کاهش می‌یابد (۴۲). فراوانی همزیستی میکوریزی همبستگی مثبتی با مواد آلی (۴) و رابطه عکس با فسفر قابل جذب (۱۸) دارد. هدایت الکتریکی (EC) خاک با تنفس ناشی از بستره و پتاسیم خاک همبستگی مثبت، قوی و معنی‌داری ($p\leq0.01$) را نشان دارد. تنفس پایه خاک با تنفس ناشی از بستره و ضریب معدنی شدن کربن میکروبی و کربن آلی خاک همبستگی مثبت و با فسفر قابل دسترس خاک همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ($p\leq0.01$) نشان داد. تنفس خاک و ضریب معدنی شدن کربن میکروبی می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های مفید و حساس کیفیت خاک مورد استفاده قرار گیرند، زیرا نشان دهنده میزان گردش کربن و در دسترس بودن بستر برای میکروب‌های هتروتروف هستند (۳۵).

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا تحلیل عاملی (PCA)

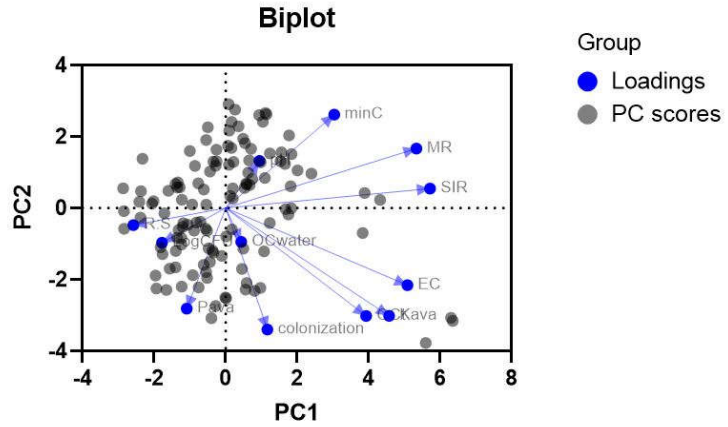
نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای متغیرها (صفات) نشان داد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم با مقادیر ویژه ۳/۷۶ و ۳/۳۵ به‌ترتیب ۲۳/۵ و ۲۰/۹ درصد از تغییرات ویژگی‌های محیطی را توجیه می‌کنند. این مقادیر ویژه هر چه بزرگتر باشند یعنی این مؤلفه‌ها اندازه و حجم بیشتری از داده‌ها را در اختیار داشته و اهمیت بیشتری دارند. در این پژوهش چهار مؤلفه اول، دوم، سوم و چهارم قادر به بیان ۷۶/۸ درصد از پراکندگی و واریانس داده‌ها هستند، بنابراین ۱۱ مشخصه اندازه‌گیری شده در خاک به چهار مؤلفه اصلی تبدیل شدند. نتایج همبستگی متغیرها نیز نشان داد (جدول ۴) که مؤلفه اصلی اول با قابلیت هدایت الکتریکی (EC) یا شوری خاک (۰/۸۲)، تنفس ناشی از بستره (۰/۷۰)، کربن آلی خاک (۰/۶۹) و پتاسیم قابل دسترس (۰/۸۰) همبستگی مثبت و قوی دارد. مؤلفه دوم با تنفس پایه خاک (۰/۷۴) و ضریب معدنی شدن کربن میکروبی (۰/۸۶) همبستگی مثبت و قوی و با درصد کلنیزاسیون ریشه و فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک همبستگی منفی دارد. مؤلفه سوم نیز با جمعیت میکروبی ریزوسفر (۰/۹۵) و نسبت R/S (۰/۹۲) همبستگی مثبت و خیلی قوی دارد. مؤلفه چهارم نیز فقط با کربن آلی محلول در آب سرد (۰/۹۰) همبستگی مثبت نشان داد (شکل ۲، جدول ۴).

تعیین شاخص کیفیت خاک

نتایج شاخص کیفیت خاک از ۰ تا ۱ متغیر است. هنگامی که شاخص کیفیت خاک (SQI) یک باشد، خاک بالاترین کیفیت را برای عملکرد ارزیابی شده ارائه می‌دهد. در مقابل، زمانی که SQI برابر صفر باشد، نشان دهنده کیفیت پایین خاک یا خاک تخریب شده و یا تخلیه شده است. این روش در طیف وسیعی از موقعیت‌ها مفید است (۴۱). تجزیه و تحلیل عاملی نشان داد که حدود ۷۷ درصد از واریانس کل با پنج مؤلفه معنی‌دار با مقادیر ویژه بیش از یک و واریانس‌های کمتر از ۵ درصد و ارزش اشتراکی (communality) بالای ۶۱ درصد توضیح داده می‌شوند (جدول ۴). اولین مؤلفه که ۲۴ درصد از کل واریانس را به خود اختصاص داد، بیشترین بار عاملی (> ۰/۸) را از شوری خاک (EC) و پتاسیم قابل دسترس خاک داشت. بنابراین

جدول ۳. ماتریس ضرایب همبستگی جفتی (r) بین خواص خاک اندازه‌گیری شده (n = 40)

خواص خاک	Coloniz	pH	EC	MR	SIR	OC	OCw	minC	CFU	R/S	AP	AK
Coloniz	۱/۰۰											
pH	−۰/۱۰۸	۱/۰۰										
EC	۰/۳۳۶**	۰/۰۳۹	۱/۰۰									
MR	−۰/۱۳۵	۰/۱۹۴*	۰/۲۱۵**	۱/۰۰								
SIR	−۰/۰۹۵	۰/۰۲۸	۰/۵۰۳**	۰/۵۷۵**	۱/۰۰							
OC	۰/۲۴۵*	−۰/۰۲۲	۰/۳۵۸**	۰/۲۶۲**	۰/۳۲۰**	۱/۰۰						
OCw	−۰/۰۳۵	−۰/۱۵۳	−۰/۰۴۷	۰/۰۸۱	−۰/۱۰۵	۰/۲۲۳**	۱/۰۰					
minC	−۰/۲۷۵*	۰/۲۱۲*	۰/۰۰۶	۰/۷۹۶**	۰/۳۵۶**	−۰/۲۸۳**	−۰/۰۴۰	۱/۰۰				
CFU	−۰/۲۴۶*	−۰/۱۰۰	۰/۰۸۲	−۰/۱۰۶	−۰/۰۷۵	۰/۰۳۴	−۰/۰۲۶	−۰/۱۷۵*	۱/۰۰			
R/S	−۰/۲۷۹*	−۰/۱۳۸	−۰/۰۹۱	−۰/۰۸۹	−۰/۱۳۹	−۰/۰۴۲	−۰/۰۱۰	−۰/۱۱۲	۰/۸۶۵**	۱/۰۰		
AP	۰/۳۷۵**	−۰/۱۲۴	−۰/۰۴۳	−۰/۲۳۴**	−۰/۲۰۱*	۰/۱۰۱	۰/۰۲۳	−۰/۱۹۷*	−۰/۰۵۳	۰/۰۰۴	۱/۰۰	
AK	۰/۱۶۸*	−۰/۱۵۷*	۰/۶۵۷**	۰/۱۹۹*	۰/۳۵۱**	۰/۵۳۰**	۰/۱۳۳	−۰/۱۰۱	۰/۰۹۵	−۰/۰۳۶	۰/۱۲۹	۱/۰۰



شکل ۲. پراکنش و گروه‌بندی (مؤلفه‌ها) نمونه‌های خاک در طول محورهای ۱ و ۲ PCA

این مؤلفه (عامل) به‌عنوان جزء شیمیایی خاک محسوب می‌شود که تنها شوری خاک (EC) با بالاترین بار عاملی (۰/۸۳) به‌عنوان شاخص بالقوه برای کیفیت خاک (SQI) در مؤلفه اول انتخاب می‌شود. تنفس پایه و ضریب معدنی شدن کربن میکروبی، دو ویژگی هستند که به شدت بر مؤلفه دوم تأثیر گذاشتند، که ۲۰/۹ درصد از واریانس کل را نشان دادند (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه دوم عمدتاً با فعالیت میکروبی خاک مرتبط بوده و بنابراین مؤلفه جزء فعالیت میکروبی خاک نامیده می‌شود، زیرا بسیاری از خواص خاک، عملکردهای میکروبی برای تجزیه ماده آلی و چرخه عناصر غذایی را تحت

جدول ۴. ضرایب بارگذاری متغیرها (وکتورهای ویژه) چهار عامل چرخشی واریماکس (با نرمال‌سازی کایزر) با استفاده از ۲۳ ویژگی خاک، مقادیر ویژه آن‌ها و درصد فردی از واریانس کل که توسط هر عامل توضیح داده شده است، استخراج شد.

خصوصیات خاک	مؤلفه ۱	مؤلفه ۲	مؤلفه ۳	مؤلفه ۴	Communality
Coloniz	۰/۲۹۳	−۰/۵۹۳	−۰/۴۲۵	−۰/۱۳۲	۰/۶۳۵
pH	−۰/۰۱۶	۰/۳۳۵	−۰/۱۶۳	−۰/۱۴۸	۰/۶۱۴
EC	۰/۸۲۶	−۰/۱۲۲	۰/۰۴۱	−۰/۲۵۹	۰/۷۶۶
MR	۰/۵۱۳	۰/۷۴۱	−۰/۰۷۸	۰/۱۴۱	۰/۸۳۹
SIR	۰/۷۰۵	۰/۴۲۹	−۰/۰۱۱	−۰/۱۲۲	۰/۶۹۵
OC	۰/۶۹۳	−۰/۲۶۲	۰/۰۲۲	۰/۲۷۶	۰/۶۲۵
OCw	۰/۰۶۳	−۰/۰۲۵	−۰/۰۰۸	۰/۸۹۷	۰/۸۱۰
minC	۰/۱۰۷	۰/۸۵۶	−۰/۱۵۰	−۰/۰۰۵	۰/۷۶۷
CFU	۰/۰۱۳	−۰/۰۹۸	۰/۹۴۸	−۰/۰۶۷	۰/۹۱۳
R/S	−۰/۱۲۷	−۰/۰۴۸	۰/۹۲۴	۰/۰۲۰	۰/۸۷۳
AP	۰/۰۰۴	−۰/۵۴۱	−۰/۱۶۲	۰/۰۶۰	۰/۶۲۲
AK	۰/۸۰۳	−۰/۲۳۲	۰/۱۱۵	۰/۱۱۹	۰/۷۲۶
مقادیر ویژه (EV)	۳/۷۶	۳/۳۵	۲/۹۹	۲/۱۷	۱۲/۲۸
واریانس فردی (٪)	۲۳/۵۵	۲۰/۹۳	۱۸/۷۱	۱۳/۵۸	
واریانس تجمعی (٪)	۲۳/۵۵	۴۴/۴۸	۶۳/۱۶	۷۶/۷۸	
وزن نرمال شده	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۱۸	

اختصارات: Coloniz، کلنیزاسیون ریشه؛ pH، واکنش خاک؛ EC، قابلیت هدایت الکتریکی. MR، تنفس پایه میکروبی؛ SIR، تنفس ناشی از بستره؛ OC، کربن آلی؛ OCw، کربن آلی محلول در آب سرد؛ minC، ضریب معدنی شدن کربن میکروبی؛ CFU، جمعیت میکروبی ریزوسفری؛ R/S، نسبت جمعیت میکروبی خاک ریزوسفر به غیرریزوسفری؛ AP، فسفر قابل دسترس خاک؛ AK، پتاسیم قابل دسترس خاک.

تأثیر قرار می‌دهند (۲۴). از آنجایی که این ویژگی‌های خاک همبستگی بالایی داشتند، ضریب معدنی شدن کربن میکروبی که دارای بیشترین بار عاملی (۰/۸۶) بود، به‌عنوان دومین متغیر مهم خاک برای گنجاندن در شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد. مؤلفه سوم ۱۸/۷ درصد از واریانس کل را نشان داد و بیشترین بار عاملی برای جمعیت میکروبی ریزوسفری (۰/۹۵) و نسبت R/S (۰/۹۲) بود. این مؤلفه جزء جمعیت میکروبی نامیده می‌شود. این دو ویژگی خاک با یکدیگر همبستگی قوی داشتند، بنابراین جمعیت میکروبی ریزوسفری خاک با بیشترین بار عاملی به‌عنوان شاخص کیفیت خاک انتخاب شد. حدود ۱۴ درصد از واریانش کل با مؤلفه ۴ بیان شد که بیشترین بار عاملی را از کربن آلی محلول در آب سرد (۰/۹) داشت. این مؤلفه عمدتاً با ماده آلی خاک مرتبط است و بنابراین جزء ماده آلی خاک (SOM) نامیده می‌شود. بنابراین ۴ مورد از ۱۱ ویژگی اولیه خاک بادامستان‌های استان به‌ترتیب اهمیت شوری خاک، ضریب معدنی شدن کربن میکروبی، جمعیت میکروبی ریزوسفری خاک و کربن آلی محلول در آب به‌عنوان شاخص کیفیت خاک شناخته شدند (جدول ۴). بنابراین شاخص کیفیت خاک دارای چهار جزء شیمیایی، فعالیت میکروبی خاک،

جمعیت میکروبی و ماده آلی خاک است که به‌صورت معادله زیر نشان داده شد:

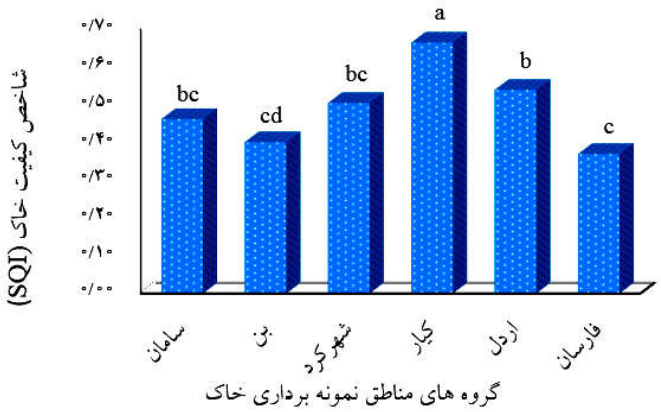
+ فعالیت میکروبی + جزء شیمیایی = اجزای شاخص کیفی خاک (خطی)
ماده آلی خاک + جمعیت میکروبی

$$L-SQI=\left[0.31\times\left(EC/2.91\right)\right]+\left[0.72\times\left(\min C/0.41\right)\right]+\left[0.24\times\left(CFU/\left(1.51\times109\right)\right)\right]+\left[0.18\times OCW/2.63\right] \quad (۲)$$

به‌طور متوسط، ترتیب سهم نسبی شاخص‌های انتخاب شده در معادله شاخص کیفیت خاک (SQI) محاسبه شده است که ۳۱ درصد برای شوری خاک (EC)، ۲۷ درصد برای ضریب معدنی شدن کربن میکروبی (minC)، ۲۴ درصد برای جمعیت میکروبی ریزوسفری (CFU) و ۱۸ درصد برای کربن آلی محلول در آب (OCW) بود (جدول ۴). قابلیت هدایت الکتریکی یا شوری خاک بیشترین وزن را داشت که منجر به بیشترین سهم در SQI شد، در حالیکه کربن محلول در آب سرد کمترین سهم را در SQI دارد. تنفس میکروبی خاک که اندازه فعالیت بالقوه متابولیکی خاک ناشی از جامعه میکروبی است توسط ماستو و همکاران(۲۴) به‌عنوان شاخص کیفیت خاک انتخاب شد زیرا می‌تواند توانایی خاک رار برای مقاومت در برابر تخریب بیوشیمیایی منعکس کند. زیست توده میکروبی نیز به‌عنوان شاخص کیفیت خاک در شمال شرقی چین پیشنهاد شد (۵۰).

نتایج نشان داد که این شیوه امتیازدهی با در نظر گرفتن حساسیت و دقت، مناطق مختلف با مدیریت‌های متفاوت باغات بادام بر کیفیت خاک را به خوبی به‌صورت کمی نشان می‌دهد (شکل ۳). مقادیر شاخص کیفیت خاک خطی (L-SQI) در مناطق مختلف باغ بادام استان دامنه‌ای از ۰/۳۷ تا ۰/۶۷ بود، که بهترین شاخص کیفیت خاک مربوط به باغات منطقه کیار و کمترین مربوط به منطقه فارسان است (شکل ۳). این شیوه امتیازدهی به‌صورت خطی به دانش قبلی کمی نیاز دارد و از نظر طراحی و کاربرد پیچیدگی کمتری نسبت به روش‌های غیرخطی دارد (۲ و ۳۵). مقادیر پایین شاخص کیفیت خاک در این مناطق نشان از عملکرد ضعیف خاک و اکوسیستم ناپایدار خاک است. تعیین این شاخص نشان داد که اهمیت فعالیت میکروبی، زیست توده میکروبی و کربن آلی خاک بیشتر است و در این باغات نیاز است که به پایداری خاک و مصرف کمتر نهاده‌های شیمیایی اهمیت داده شود. شاخص کیفیت خاک (SQI) باید نسبت به اقدامات مدیریت زراعی و ناهنجاری‌های مربوط حساس باشد و باید بهبود و بازیابی حاک‌های تخریب شده را منعکس کند (۲۱). متأسفانه تحقیقات در مورد شاخص‌های کیفیت خاک در باغات درختی کمیاب است (۲۹). با این حال، کاستلینی و همکاران (۸) اثرات خاکورزی بر کیفیت فیزیکی خاک یک باغ بادام در جنوب ایتالیا را ارزیابی کرد. آن‌ها مشاهده کردند که پس از ۳۰ سال بدون خاک‌ورزی، خاک را می‌توان به‌عنوان خاک با کیفیت خوب طبقه بندی کرد. با این وجود، خاک کشت شده در باغ بادام آن‌ها نیز از نظر چگالی ظاهری و ظرفیت نگهداری آب، نشانه‌هایی از کیفیت فیزیکی خوب را نشان داد. شاخص کیفیت خاک باغ‌های بادام جوان و با مدیریت متفاوت در شرایط مدیترانه‌ای (۲۶) در اسپانیا برای سه باغ آلاکون، سن‌مارتین و والدالگورفا به‌ترتیب ۰/۵۵، ۰/۷۵ و ۰/۵۴ گزارش شد. این محققین گزارش دادند که این خاک‌های ارزیابی شده برای تولید بادام کافی هستند، اگرچه نیاز به اقدامات مدیریتی برای بهبود کیفیت آن‌ها و افزایش پایداری این اکوسیستم‌های کشاورزی وجود دارد.

در مطالعه‌ای که توسط رئیسی و توکلی (۳۶) برای ارزیابی کیفیت خاک سطحی در سطح چشم‌انداز در امتداد موقعیت‌های شیب در باغات بادام انجام شد، چهار ویژگی کربن زیست توده میکروبی، نیتروژن، پتاسیم و فسفر قابل دسترس، به‌عنوان شاخص‌ترین شاخص برای حداقل مجموعه داده‌ها شناسایی شدند. سهم نسبی زیست توده میکروبی خاک در مقدار SQI حداکثر (۴۳ ٪) و برای نیتروژن موجود (۲۵ ٪)، پتاسیم (۱۶ ٪) و فسفر (۱۶ ٪) شد. اطلاعات در مورد کیفیت خاک برای دستیابی به چالش کلیدی طراحی سیستم‌های باغی که می‌توانند شیوه‌های پایدار، دانش چرخه عناصر غذایی و ارتقای تنوع زیستی خاک را ادغام کنند، حیاتی است.



شکل ۳. شاخص کیفیت خاک (SQI)کلی باغات بادام در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر با استفاده از توابع امتیازدهی خطی (PCA) برآورد شد (با مقادیر میانگین)

نتیجه‌گیری

خاک‌ها ۹۵ درصد از تولیدات کشاورزی را پوشش می‌دهند، بنابراین بدون تردید نیاز به دستیابی به شیوه‌های مدیریت خاک پایدار در مقیاس جهانی وجود دارد. در مطالعه حاضر، روش مورد استفاده برای ارزیابی کیفیت خاک در شناسایی تأثیر مکان، شیوه‌های مدیریتی (استفاده از نهاده‌های آلی و شیمیایی) و ماهیت خاک بر وضعیت کیفیت خاک‌های باغ‌های بادام کارآمد بود. عوامل خاکی که بیشتر به شاخص کلی کیفیت خاک کمک کرد، جزء شیمیایی، فعالیت و جمعیت میکروبی و ماده آلی بود. در پایان، شاخص‌های کلی کیفیت خاک از ۰/۳۷ تا ۰/۶۷ متغیر بود. مقادیر شاخص کیفیت خاک برای باغ‌های بادام سامان، بن، شهرکرد، کیار، اردل و فارسان به‌ترتیب ۰/۴۶، ۰/۴۰، ۰/۵۱، ۰/۶۷، ۰/۵۴ و ۰/۳۷ بود. این مقادیر نشان می‌دهند که خاک‌های ارزیابی شده برای تولید بادام در شهرکرد، کیار و اردل (< ۰/۵) مناسب هستند. این مقادیر نشان می‌دهد که خاک‌های ارزیابی شده برای تولید بادام نیاز به اقدامات مدیریتی برای بهبود کیفیت آن‌ها (مثال، استفاده از بهسازهای آلی و زیستی) و افزایش پایداری این اکوسیستم‌های کشاورزی وجود دارد. بنابراین، مشاوران کشاورزی، مروجین، محققان و باغداران می‌توانند از چنین گزارش کیفیت خاک برای انجام تصمیمات آگاهانه، تفسیر مشاهدات میدانی و ارزیابی نتایج آزمایشگاهی استفاده کنند که منجر به مدیریت پایدار این اکوسیستم‌های کشاورزی می‌شود. همچنین اعتبار سنجی شاخص کیفیت خاک توسعه یافته در اینجا و ایجاد رابطه عملکردی بین SQI و عملکرد گیاه ضروری است.

منابع مورد استفاده

1. Alef, K. and P. Nannipieri. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press. pp. 214–216.
2. Andrews, S. S., D. L. Karlen and J. P. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25–45.
3. Bamutaze, Y., M.E. Meadows, M. Mwanjalolo and P. Musinguzi 2021. Effect of land use systems and topographical attributes on the condition of surface soil physicochemical properties in a highland catchment of the Lake Victoria Basin, Uganda. *CATENA* 203:105343. https:// doi. org/ 10. 1016/j. catena. 2021. 105343.
4. Bhardwaj, S., S. S. Dudeja and A. L. Khurana 1997. Distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in the natural ecosystem, *Folia Microbial* 42(6): 589-594.

5. Borrelli, P.; D. A. Robinson, P. Panagos, E. Lugato, J. E. Yang, C. Alewell, D. Wuepper, L. Montanarella and C. Ballabio. 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *In* Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 117: 21994–22001.
6. Brady, N. and V.Ray. 2015. Soil nature and characteristics. Translated by Seyyed Saber Shahoui, first edition, Kurdistan University Press, 880 p. (in Farsi).
7. Bunemann, E. K., G. Bongiorno, Z. Bai, R. E. Creamer, G. D. Deyn, R. Goede, L. Fleskens, V. Geissen and T. W. Kuyper. 2018. Soil quality: a critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120:105–125. https:// doi. org/ 10. 1016/j.soilb io. 2018. 01. 030.
8. Castellini, M.; M. Pirastru, M. Niedda and D. Ventrella. 2013. Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy* 8: 149–157.
9. Celik, I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research* 83: 270–277.
10. Cerdà, A.; J. Rodrigo-Comino, A. Giménez-Morera and S.D. Keesstra. 2018. Hydrological and erosional impact and farmer's perception on catch crops and weeds in citrus organic farming in Canyoles river watershed, Eastern Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 258: 49–58.
11. Emami, A. 1996. Plant Analysis Methods, Soil and Water Research Organization. Publication 982. Vol. 1: pp. 128. (in Farsi).
12. Giovannetti, M. and B. Mosse. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist* 84(3): 489–500.
13. Grattan, S.R. 2002. Irrigation water salinity and crop production. Universiy of California. ANR Publication. 8066.
14. Gregorich, E. G., M. H. Beare, U. Stoklas and P. St-Georges. 2003. Biodegradibility of soluble organic matter in maize-cropped soils. *Geoderma* 113: 237-252.
15. Ibricki, H.; M. Cetin, E. Karnez, W. A. Flügel, B. Tilkici, Y. Bulbul and J. Ryan 2015. Irrigation-induced nitrate losses assessed in a Mediterranean irrigation district. *Agricultural Water Management* 148: 223–231.
16. Imani, A., M. Jafar Aghaei, D. Hosseini, J. Dejampour& and A. Mousavi. 2018. Investigating and determining the productivity of almond commercial cultivars in different seasons and stages of growth (final report). p. 84, registration number 9426/90. (in Farsi).
17. Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61:4–10.
18. Kasariani, F., Zare, H. M. & Chai-Chi, M.R. (2006). Mycorrhizal plant cover distribution in relation to some soil characteristics in Kavir National Park. *Journal of Environmental Studies 33*(44). (in Farsi).
19. Katznelson, H. 1946. The rhizosphere effect of mangels on certain groups of microorganisms. *Soil Science*, 62:343–354.
20. Kayani, S. and M. J. Malkuti. 2000. The necessity of optimal use of chemical fertilizers to increase the production of almonds in the country. Technical Journal No. 112, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute, p. 19. (in Farsi).
21. Lal, R. 1997. Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 325: 997-1010.
22. Lal, R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability* 7:5875–5895.
23. Lansac, A. R., A. Martin and A. Roldán. 1995. Mycorrhizal colonization and drought interactions of Mediterranean shrubs under greenhouse conditions. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 9:167-175.
24. Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D. & Patra, A. K. (2007). Soil quality response to longterm nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 18, 130–142.
25. McGonigle, T., M. Miller, D. Evans, G. Fairchild and J. Swan. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115(3): 495–501.
26. Mirás-Avalos, J. M.; P. Marco, S. Sánchez, B. Bielsa, M. J. Rubio Cabetas and V. González. 2022. Soil Quality Index of Young and Differently Managed Almond Orchards under Mediterranean Conditions. *Sustainability 14:* 14770. https://doi.org/10.3390/su142214770.
27. Mohammadi Eshkaftaki, M. and F. Rejali, 2021. Effect of mychorhizal symbiosis on growth properties and colonization of common Almond rootstock at water deficit conditions. *Journal of Sol Biology 9*(1), 15-28. doi: 10.22092/sbj.2020.343209.197 (in Farsi).
28. Moradinasab, V., M. Shirvani, M. Shamsaee and M. R. Babaee. 2016. Assessing Some Chemical and Biological Quality Attributes of Soils Irrigated with Groundwater and Treated Industrial Wastewater in Greenspace of Mobarake Steel Complex. *Journal of Water and Soil Science* 19 (74) :101-111. (in Farsi).
29. Morugán-Coronado, A.; C. Linares, M.D. Gómez-López, A. Faz and R. Zornoza. 2020. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems* 178: 102736.

30. Nannipieri, P., J. Ascher, M. T. Ceccherini, L. Landi, G. Pietramellara and G. Renella. 2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54:655–670.
31. Nelson, D. W. and L. E. Somers. 1996. *Total carbon, organic carbon and organic matter of soil analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madision, Wisconsin. USA, Pp: 961-1010.
32. Ozcan, M. M. 2023. A review on some properties of almond: ımpact of processing, fatty acids, polyphenols, nutrients, bioactive properties, and health aspects. *Journal of Food Science and Technology* 60(5): 1493-1504.
33. Pandey, A. & Palni, L.M. (2007). The rhizosphere effect in trees of the Indian central Himalaya with special reference to altitude. *Applied Ecology and Environmental Research* 5(1): 93–102.
34. Pinton, R., Z. Varanini and P. Nannipieri. 2001. The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil-plant interface. Marcel Dekker, Inc. New York, Basel. pp. 424.
35. Raiesi, F. and M. Pejman 2021. Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index. *Catena* 201:105202. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105202
36. Raiesi, F. and M. Tavakoli. 2022. Developing a soil quality index model for assessing landscape‐level soil quality along a toposequence in almond orchards using factor analysis, *Modeling Earth Systems and Environment* 8:4035–4050.
37. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. (Ed), Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, Madison. pp. 417-435.
38. Riches, D.; I. Porter, D. Oliver, R. Bramley, B. Rawnsley, J. Edwards and R. White. 2013. Review: Soil biological properties as indicators of soil quality in Australian viticulture. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19:311–323.
39. Ritz, K., H. I. J. Black, C. D. Campbell, J. A. Harris and C. Wood. 2009. Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific opinion to assist policy development. *Ecological Indicators* 9:1212–1221.
40. Roldan-Fagardo, B. E., J. M. Barea, J. A. Ocampo and C. Azcon-Aguilar. 1982. The effect of season on VA mycorrhiza of the almond tree and of phosphate fertilization and species of endophyte on its mycorrhizal dependency. *Plant and Soil* 68:361–367.
41. Samaei, F.; H. Emami and A. Lakzian. 2022. Assessing soil quality of pasture and agriculture land uses in Shandiz county, northwestern Iran. *Ecological Indicators* 139: 108974.
42. Sheng, M., M. Tang, H. Chen, B. Yang, F. Zhang and Y. Huang. 2008. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress, *Mycorrhiza* 18: 287-296.
43. Smith, E., P. Leeflang, S. Gommans, J. Van den Broek, S. Van Mil and K. Wernars. 2001. Diversity and seasonal fluctuations of the dominant members of the bacterial soil community in a wheat field as determined by cultivation and molecular methods. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 2284-2291.
44. Soltani, S., L. Yaghmai, M. Khodagoli and R. Sabouhi. 2011. Bioclimatic Classification of Chahar-Mahal & Bakhtiari Province Using Multivariate Statistical Methods. *Journal of Water and Soil Science* 14 (54) :53-68. (in Farsi).
45. Tabatabai, S.J. 2009. Principles of Mineral Nutrition of Plants. Publishing the Author, Tabriz, 389 p.
46. Thangavelu, M. and P. Arumugam. 2019. Influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and phosphate-solubilizing bacterium inoculation at stem cutting stage on P uptake and growth of Impatiens walleriana plants in an unsterile field soil. *Journal of Horticultural Research* 27(2): 11–22.
47. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed), Methods of Soil Analysis. Soil Science Society of America, Madison. pp. 475-490.
48. Thomsen, M., J. H. Faber and P. B. Sorensen. 2012. Soil ecosystem health and services – evaluation of ecological indicators susceptible to chemical stressors. *Ecological Indicators* 16:67–75.
49. Vasu, D., N. Sahu, P. Tiwary and P. Chandran. 2021. Modelling the spatial variability of soil micronutrients for site specific nutrient management in a semi-arid tropical environment. *Modeling Earth Systems and Environment* 7:1797–1812. https:// doi. org/ 10. 1007/ s40808- 020- 00909-4.
50. Wang, L. and Q. Fu. 2020. Soil quality assessment of vegetation restoration after a large forest fire in Daxing anl1ing, northeast China. *Canadian Journal of Soil Science* 100, 1–13, dx.doi.org/10.1139/cjss-2019-0013.
51. Wesley, W., P.E. Wallender, K. Kenneth and K. Tanji. 2012. Agricultural Salinity Assessment and Management (2^{th}). American Society of Civil Engineers, p. 1094.
52. Zahedifar, M. 2023. Assessing Alteration of Soil Quality, Degradation, and Resistance Indices under Different Land Uses through Network and Factor Analysis. *Catena*, 222, 106807.
53. Zhang, L., Y. Jing, Y. Xiang, R. Zhang and H. Luc. 2018. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: a meta-analysis. *Science of the Total Environment* 643, 926–935.