



ارزیابی نقش ویژگی‌های زیستی در کیفیت خاک زیر حوضه هنام استان لرستان

اشرف اسمعیلی زاد، رسول شکری*، ناصر دوات‌گر و حسین کاری دولت‌آباد

دانشجوی دکترا گروه میکروبیولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان؛ noblesse55@gmail.com

استادیار گروه میکروبیولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان؛ rsh.bio42@gmail.com

دانشیار موسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ n_davatgar@yahoo.com

استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ hossein.kari@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۷ و پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۸

«مقاله پژوهشی»

چکیده

امروزه استفاده از کیفیت خاک (SQ) در مدیریت پایدار اراضی خاک در حال توسعه است، اما در ارزیابی کیفیت خاک به علت سختی و پرهزینه بودن اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی، این ویژگی‌ها کمتر استفاده می‌شوند. این در حالی است که نقش آن‌ها در کیفیت خاک قابل چشم‌پوشی نیست. این مطالعه تلاش دارد نقش ویژگی‌های زیستی را در کیفیت خاک تبیین نماید. در این تحقیق، ۲۲ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی در ۹۰ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) برای ارزیابی شاخص کیفیت خاک (SQI) در منطقه هنام لرستان اندازه‌گیری شد. این ویژگی‌ها شامل EC، pH، کربن آلی، درصد مواد خنثی شونده؛ رس؛ سیلت؛ کربن زیست‌توده و تنفس پایه میکروبی؛ جمعیت کل قارچ و باکتری، جمعیت گونه‌های ازتوباکتر و سودوموناس؛ فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی؛ غلظت پتاسیم و فسفر قابل‌دسترس؛ نیتروژن کل؛ منگنز؛ آهن؛ مس و روی بود. تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انتخاب مجموعه داده‌های حداقل (MDS) نشان داد که هشت مؤلفه اصلی با مقادیر ویژه بیشتر از یک، ۸۹/۸۳ درصد از کل واریانس تجمعی را شرح دادند. از ۲۲ ویژگی خاک، ۱۲ ویژگی برای MDS انتخاب شدند که سهم ویژگی‌های زیستی خاک (۵ ویژگی) در بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیشتر بود. توزیع مکانی SQI نشان‌دهنده تأثیرپذیری شدید کیفیت خاک‌های مطالعه شده از ویژگی‌های زیستی بود. این یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت در نظر گرفتن ویژگی‌های زیستی در تعیین کیفیت خاک است.

کلمات کلیدی: اراضی آبی و دیم، کیفیت خاک، ویژگی‌های زیستی

* - آدرس نویسنده مسئول: rsh.bio42@gmail.com



مقدمه

در کشورهای در حال توسعه به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل افزایش روزافزون نیاز به منابع غذایی، همواره به دنبال افزایش عملکرد در واحد سطح هستند که در صورت مدیریت نامناسب با فشار بر منابع خاک سبب کاهش تنوع زیستی و کیفیت خاک و به هم خوردن تعادل محیط‌زیست و تهدید امنیت غذایی می‌شود. ارزیابی کیفیت خاک (SQ)^۱ رویکردی است که اطلاعاتی درباره چگونگی بهره‌برداری پایدار از منابع خاک را ارائه می‌کند (یو و همکاران، ۲۰۱۸). کیفیت خاک به نوع مشخصی از توانایی خاک اشاره دارد که بتواند در محدوده‌های طبیعی یا محدوده‌های اکولوژیکی تنظیم‌شده برای حفظ یا افزایش بازده گیاهی و حیوانی، کیفیت هوا و آب و سلامت و سکونت عمومی عمل کند (باندوپادهای و مایتی، ۲۰۲۱؛ حیات و همکاران، ۲۰۲۱). در بیشتر اوقات، ارزیابی SQ ساده نیست زیرا خاک‌های کشاورزی بسیار پیچیده و ترکیبی از اجزای طبیعی و مدیریت انسانی هستند که بر عملکرد و فرآیندهای خاک تأثیر می‌گذارند (باندوپادهای و مایتی، ۲۰۲۱). از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک برای ارزیابی SQ استفاده می‌شود که از خاکی به خاک دیگر متفاوت هستند (واسو و همکاران، ۲۰۱۶) و به عبارت دیگر، "خاک پایدار" به مجموعه‌ای از شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک گره‌خورده است (پولادی و همکاران، ۲۰۲۰؛ نهرانی و همکاران، ۲۰۲۰). کیفیت خاک یک ارزیابی جامع از SQ شامل اندازه‌گیری دامنه وسیعی از ویژگی‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک است تا نشان دهد چگونه و کجا می‌توان کیفیت یا حاصلخیزی خاک را تغییر داد (آباس، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۰).

در بیشتر اوقات به علت آسانی و هزینه‌های اندازه‌گیری کمتر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نسبت به ویژگی‌های زیستی، فقط از آن‌ها برای ارزیابی SQ استفاده می‌شود

(مائوریا و همکاران، ۲۰۲۰)، ولی ویژگی‌های زیستی به دلیل حساسیت به تغییرات محیطی و نقش‌های حیاتی در فرآیندهای خاک در تنظیم دسترسی به عناصر غذایی و بهره‌وری اکوسیستم‌های خاکی نقش مهمی دارند (شائو و همکاران، ۲۰۲۰). شواهد رو به رشد نشان می‌دهد که ویژگی‌های زیستی خاک، پتانسیل مناسبی برای ارزیابی کیفیت خاک دارند، زیرا نسبت به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک حساس‌تر هستند (گیسلر و هوروات، ۲۰۰۹) و برای ارزیابی مدیریت و همچنین تجزیه و تحلیل اثرات فعالیت‌های مدیریتی مناسب هستند (آباس، ۲۰۲۱؛ استون و همکاران، ۲۰۱۶)؛ اما چالش بزرگ در استفاده از شاخص‌های زیستی در ارزیابی کیفیت، دشواری تفسیر مقادیر هر یک از آن‌هاست (گیل-سوترس و همکاران، ۲۰۰۵) زیرا برای بسیاری از ویژگی‌های زیستی حد بحرانی تعریف نشده است. با توجه به پیچیدگی و هزینه ارزیابی کیفیت خاک، هیچ توافقی برای فهرست جامع از پیش تعیین‌شده از ویژگی‌های خاک برای خاک‌های زراعی و غیر زراعی وجود ندارد (رضایی و همکاران، ۲۰۰۶).

از این رو، کارشناسان خاک از یک مجموعه داده حداقلی (MDS)^۲ برای کاهش هزینه فرآیندهای ارزیابی کیفیت خاک استفاده می‌کنند (یو و همکاران، ۲۰۱۸؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۳). در MDS تعداد ویژگی‌های مؤثر در ارزیابی کیفیت خاک به کمترین می‌رسد اما می‌بایست شاخص‌های جامعه خاک مطالعه شده را به درستی منعکس کند (چاندل و همکاران، ۲۰۱۸؛ رئیس، ۲۰۱۷).

حوضه رودخانه کرخه در حوضه آبریز اصلی خلیج فارس و دریای عمان قرار دارد. در بالادست و پایین‌دست این حوضه زیر حوضه‌های زیادی وجود دارد. زیر حوضه هنام یکی از آن‌هاست که در جنوب شهرستان سلسله (الشتر) در استان لرستان ایران واقع شده است. این زیر حوضه یکی از مهم‌ترین مناطق زراعی برای کشت انواع محصولات زراعی استان لرستان محسوب می‌شود. در این حوضه اراضی آبی و دیم در مجاورت یکدیگر قرار دارند.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقه مطالعه شده

این پژوهش در قسمت مرکزی کشور ایران در شمال استان لرستان، در جنوب شهر الشتر در زیر حوضه هنام از حوضه کرخه، به مساحت ۱۴۲۰۰ هکتار و از نظر مختصات جغرافیایی بین طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۱ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت اراضی کشاورزی ۴۲۷۰ هکتار بوده که اراضی آبی و دیم آن به ترتیب ۱۲۵۸ و ۲۴۱۲ هکتار و بقیه اراضی باغ است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه ۵۵۴ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا نیز به ترتیب ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین تبخیر - تعرق سالانه منطقه برابر با ۱۱۳۶ میلی‌متر است. در این منطقه ۵ تیپ اصلی واحدهای فیزیوگرافی شامل مخروط افکنه‌های آبرفتی، فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، دشت‌های دامنه‌ای، تپه‌ها، کوه‌ها و رخنمون‌های سنگی است.

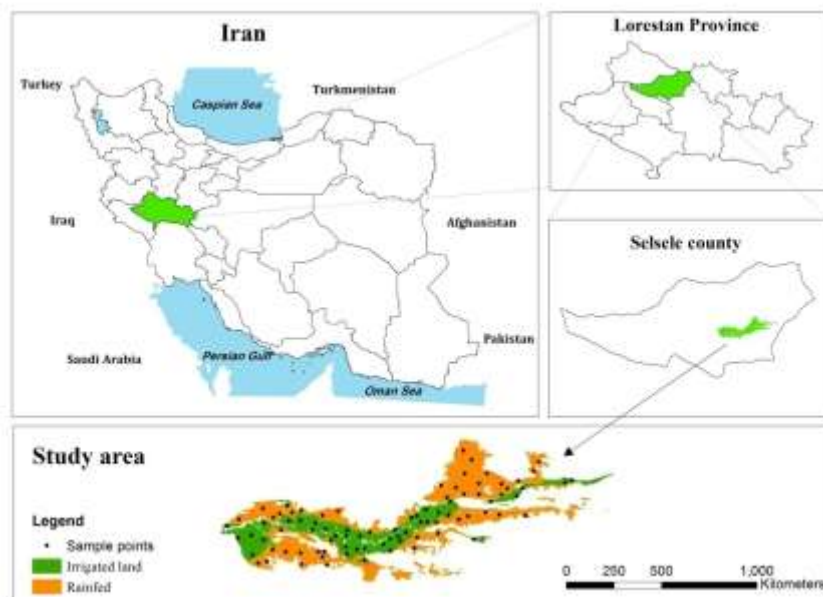
رده خاک غالب منطقه اینسپتی سول^۳ است. شیب، پستی و بلندی، فرسایش آبی، وجود سنگریزه در افق‌های سطحی و زیرسطحی از مهم‌ترین محدودیت‌های ظاهری اراضی این منطقه هستند.

گیاهان به ترتیب گندم، جو و نخود از مهم‌ترین گیاهان زراعی منطقه هستند که در این مکان کشت می‌شوند (حصاری و اویسی، ۲۰۲۱). باغات (گردو و میوه‌های سردسیری) سهم کمی از اراضی را دارند.

مطالعات متعددی در زمینه بهره‌برداری از منابع آب و خاک در زیر حوضه هنام انجام شده که نشان می‌دهد مدیریت بهره‌برداری از خاک آن اشتباه بوده و تأثیر خود را در بهره‌برداری پایدار از منطقه می‌گذارد. از جمله مدیریت‌های رایج اشتباه در اراضی منطقه شامل شخم و شیار موازی با شیب زمین، عدم رعایت تناوب کشت و اصول تناسب اراضی، استفاده از رقم‌های کم محصول گندم و جو که بیشتر برای مصارف دام در منطقه است. رعایت نکردن اصول کشاورزی حفاظتی و استفاده از روش‌های سنتی آبیاری در زمین‌های آبی منطقه که در حاشیه رودخانه‌ها واقع شده‌اند باعث از بین رفتن عناصر غذایی خاک می‌شود. در اراضی دیم نیز به دلیل دور بودن از رودخانه و استفاده نکردن از سیستم‌های نوین آبیاری برای انتقال آب به این زمین‌ها، این اراضی در سال‌های خشکسالی رها می‌شوند (پرهمت و همکاران، ۲۰۱۲؛ میلانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ توکلی و همکاران، ۲۰۱۰).

تاکنون مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی خاک‌ها و نقش آن‌ها در کیفیت خاک در زمین‌های آبی و دیم مجاور هم در زیر حوضه هنام لرستان انجام نشده است. این مطالعه باهدف:

- ۱) تعیین وضعیت ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی خاک
- و ۲) تعیین نقش ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی در کیفیت حاصلخیزی خاک انجام شد.



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه در زیر حوضه هنام استان لرستان و نقاط نمونه‌برداری در هر دو اراضی آبی (سبز) و دیم (نارنجی)

برای ارزیابی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی، نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده هوا خشک و از طریق الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برای ارزیابی ویژگی‌های زیستی نمونه‌های مرطوب پس از عبور داده شدن از الک دو میلی‌متری تا شروع آزمایش در دمای 4°C نگهداری شدند. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و بیوشیمیایی به همراه روش اندازه‌گیری آن‌ها در (جدول ۱) نشان داده شدند.

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک با در نظر گرفتن واحدهای همگن خاک و آب به‌دست‌آمده از مطالعات انجام‌شده در منطقه (افتخاری، ۱۳۹۷) در ۹۰ موقعیت (۴۵ موقعیت از اراضی دیم و ۴۵ موقعیت از اراضی آبی) از خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) نمونه‌برداری انجام شد.

جدول ۱- روش‌های اندازه‌گیری و اطلاعات مربوط به ویژگی‌های مورد مطالعه

منبع مورد استفاده	روش اندازه‌گیری	واحد	اختصار	ویژگی خاک
شینر و همکاران، ۲۰۱۲	پخش سری رقت از سوسپانسیون میکروبی در پلیت	Log cfu. ml ⁻¹	TB	جمعیت کل باکتری
شینر و همکاران، ۲۰۱۲	پخش سری رقت از سوسپانسیون میکروبی در پلیت	Log cfu. ml ⁻¹	TF	جمعیت کل قارچ
شینر و همکاران، ۲۰۱۲	پخش سری رقت از سوسپانسیون میکروبی در پلیت	Log cfu. ml ⁻¹	P	جمعیت گونه‌های سودوموناس
شینر و همکاران، ۲۰۱۲	پخش سری رقت از سوسپانسیون میکروبی در پلیت	Log cfu. ml ⁻¹	A	جمعیت گونه‌های ازتوباکتر
هوروات و پائول، ۱۹۹۴	تدخین با کلروفورم - استخراج	mg C _{min} . kg ⁻¹ soil	MBC	کربن زیست توده میکروبی
الف و نانیبیر، ۱۹۹۵	تولید CO ₂ با تیتراسیون سود باقیمانده (۰/۰۵ مولار) با اسیدکلریدریک (۰/۰۵ مولار)	mg CO ₂ . g ⁻¹ soil day ⁻¹	MR	تنفس پایه خاک
الف و نانیبیر، ۱۹۹۵	واکنش آنزیم سوبسترا در شرایط استاندارد (اوره ۲۰۰ میلی مولار، ۹ pH، ۳۷ °C، ۲ ساعت)	μg N. g ⁻¹ dm ² h ⁻¹	UA	فعالیت آنزیم اوره آز
الف و نانیبیر، ۱۹۹۵	واکنش آنزیم سوبسترا در شرایط استاندارد (دی سدیم P-نیتروفنیل فسفات ۱۵ میلی مولار، pH ۶/۵، ۳۷ °C، ۱ ساعت)	μg PNP. g ⁻¹ soil h ⁻¹	AcP	فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی
الف و نانیبیر، ۱۹۹۵	واکنش آنزیم سوبسترا در شرایط استاندارد (دی سدیم P-نیتروفنیل فسفات ۱۵ میلی مولار، pH ۱۱، ۳۷ °C، ۱ ساعت)	μg PNP. g ⁻¹ soil h ⁻¹	AIP	فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی
جی و بادر، ۱۹۸۶	روش هیدرومتری	%	-	بافت خاک (رس و سیلت)
روول، ۲۰۱۴	درصد معادل کربنات کلسیم عصاره گل اشباع	%	TNV	میزان مواد خنثی شونده
رودز، ۱۹۸۳	عصاره گل اشباع	-	pH	واکنش خاک
رودز، ۱۹۸۳	عصاره گل اشباع	dS m ⁻¹	EC	هدایت الکتریکی
اسکریمجور، ۲۰۰۸	اکسیداسیون دی کرومات پتاسیم با استفاده از روش والکی و بلک	%	OC	کربن آلی
هلمک و اسپارک، ۱۹۹۶	عصاره گیری آمونیوم استات و استفاده از فلیم فوتومتر	mg kg ⁻¹	AK	پتاسیم در دسترس
اولسن و همکاران، ۱۹۵۴	عصاره گیری با بی‌کربنات سدیم	mg kg ⁻¹	AP	فسفر در دسترس
لیندسی و نورول، ۱۹۷۸	عصاره گیری با DTPA	mg kg ⁻¹	Mn	منگنز
لیندسی و نورول، ۱۹۷۸	عصاره گیری با DTPA	mg kg ⁻¹	Fe	آهن
لیندسی و نورول، ۱۹۷۸	عصاره گیری با DTPA	mg kg ⁻¹	Cu	مس
لیندسی و نورول، ۱۹۷۸	عصاره گیری با DTPA	mg kg ⁻¹	Zn	روی
برمر، ۱۹۹۶	اکسیداسیون تر	%	TN	نیتروژن کل

شاخص کیفیت خاک (SQI)^۴

نماینده‌های کامل برای توصیف تغییرپذیری، در نظر گرفته شدند (واسوا و همکاران، ۲۰۱۳). به هر PC وزن و/یا یک‌بار عامل اختصاص داده شد تا سهم متغیرها در ساخت PC را منعکس کند. از هر PC، تنها متغیرهای با وزن بالا (با قدر مطلق بین ۱۰ درصد از بالاترین بار عامل) به ترتیب نگاه‌داری و برای ساخت MDS اعمال شدند (اندروز و همکاران ۲۰۰۴).

شاخص کیفیت خاک در سه مرحله تعیین شد (اندروز و همکاران، ۲۰۰۴): (۱) انتخاب یک MDS از ویژگی‌هایی که منعکس‌کننده عملکردها و فرآیندهای خاک بودند، (۲) امتیاز دادن متغیرهای MDS بر اساس کارایی آن‌ها و (۳) ترکیب نمرات عددی متغیرها در یک شاخص. از PCA برای انتخاب MDS استفاده شد (کی و همکاران، ۲۰۰۹). تنها PC های با مقادیر ویژه بزرگتر از یک به‌عنوان

SQI برای ویژگی‌های تبدیل یافته زیرمجموعه MDS با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (روی و همکاران، ۲۰۲۲):

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (4)$$

که در آن W_i وزن اختصاص داده شده به هر ویژگی برای هر نمونه خاک است که از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به دست آمد. هر مؤلفه اصلی (PC) مقدار معینی از تغییرات را در مجموعه داده‌ها تشریح می‌کند. با تقسیم این مقدار واریانس به حداکثر کل واریانس همه PCهای انتخاب شده برای MDS، یک مقدار وزن خاص برای متغیرهای زیرمجموعه هر PC به دست آمده آمد.

S_i ویژگی تبدیل شده با استفاده از تابع خطی (L-SQI) یا غیرخطی (NL-SQI) است. فرض بر این است که مقادیر بالاتر SQI به معنای کیفیت بهتر خاک است.

آنالیز حساسیت

شاخص‌های کیفیت خاک به دست آمده از توابع تبدیل خطی و غیرخطی با استفاده از آنالیز حساسیت ارزیابی شدند (ماستو و همکاران، ۲۰۰۸).

$$SA = \frac{SQI(\max)}{SQI(\min)} \quad (5)$$

که در آن SA مقدار آنالیز حساسیت و $SQI(\max)$ و $SQI(\min)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار SQI است. شاخص SQI با مقدار SA بیشتر، مطلوب‌تر است زیرا نسبت به عملیات مدیریتی و تخریب حساس‌تر خواهد بود.

آمار توصیفی

آماره‌های توصیفی کمترین، بیشترین، میانگین، میانه، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات برای ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و SQI محاسبه شدند. از آزمون کولموگراف - اسمیرنوف برای ارزیابی نرمال شدن داده‌ها استفاده شد. همچنین ضریب همبستگی خطی بین

همچنین در ادامه برای کاهش افزونگی درون هر مؤلفه اصلی از اندازه ضریب همبستگی خطی بین این متغیرها استفاده شد. چنانچه ضریب همبستگی پیرسون هر دو متغیر کمتر از ۰/۶ باشد، متغیر بعدی نیز در مجموعه MDS باقی می‌ماند، در غیر این صورت حذف می‌شود (اندروز و کارول، ۲۰۰۱).

از ضریب همبستگی خطی پیرسون برای تعیین همبستگی بین سنجه‌های اندازه‌گیری شده خاک در هر مؤلفه استفاده شد. سپس، هر مشاهده از یک شاخص MDS با استفاده از توابع امتیازدهی خطی (L) و غیرخطی (NL) تبدیل شدند (رینوت و همکاران، ۲۰۱۹؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸؛ رئیس، ۲۰۱۷).

توابع تبدیلی خطی استفاده شده عبارت بودند از: "بیشتر بهتر است" (معادله ۱) و "کمتر بهتر است" (معادله ۲).

$$L(y) = \frac{X}{X_{\max}} \quad (1)$$

$$L(y) = \frac{X_{\min}}{X} \quad (2)$$

که در آن $L(y)$ نمره خطی ویژگی‌های تبدیل شده در دامنه صفر تا یک، X مقدار ویژگی خاک و X_{\max} و X_{\min} بیشترین و کمترین مقدار هر ویژگی خاک هستند.

در توابع امتیازدهی غیرخطی از منحنی سیگموئیدی (معادله ۳) برای نرمال‌سازی و نمره دهی ویژگی‌های MDS استفاده شد (ماستو و همکاران، ۲۰۰۸):

$$NL(y) = \frac{a}{\left(1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b\right)} \quad (3)$$

که در آن $NL(Y)$ نمره غیرخطی هر ویژگی در دامنه صفر تا یک متغیر است؛ حداکثر مقدار (a) در این مطالعه به عنوان یک تعریف شد و توسط تابع به دست آمده بود؛ X مقدار ویژگی انتخاب شده و X_0 مقدار میانگین هر ویژگی است. شیب معادله (b) برای توابع "بیشتر بهتر است" و "کمتر بهتر است" به ترتیب ۲/۵- و ۲/۵+ بود (روی و همکاران، ۲۰۲۲؛ باندوپادهای و مایتی، ۲۰۲۱).

کمیت جوامع میکروبی را دارند، نقش محوری در افزایش کیفیت خاک دارد (حیات و همکاران، ۲۰۲۱؛ رابوت و همکاران، ۲۰۱۸).

آماره میانه برخی از ویژگی‌های حاصلخیزی خاک از جمله فسفر (AP) قابل‌استفاده ($8/6 \text{ mg/kg}$) و روی (Zn) قابل‌استفاده ($0/5 \text{ mg/kg}$) به ترتیب با توجه به حد بحرانی گندم (کشت غالب منطقه) به ترتیب mg/kg ۱۵ و 1 mg/kg (مشیری و همکاران، ۱۳۹۳) نشان دادند که نیمی از نمونه‌های خاک‌های مطالعه شده دچار کمبود این عناصر هستند.

آلوس دکاسترو لوپس و همکاران (۲۰۱۳) حد بحرانی کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)، تنفس پایه میکروبی (MR) و آنزیم فسفاتاز اسیدی (AcP) را به ترتیب (mg C Kg^{-1}) ۴۰۵، (mg C kg^{-1}) ۱۰۰ و (mg p kg^{-1}) ۱۱۵۰ بیان کردند. کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس میکروبی و فسفاتاز اسیدی در خاک‌های مطالعه شده در این پژوهش به ترتیب در دامنه ۱۴۰ تا ۹۳۳ با میانگین $\text{mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{soil}$ ۴۹۷، دامنه ۰ تا ۰/۲ با میانگین $\mu\text{g p} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{soil}$ ۳۶۴/۸ تا ۳۱/۸ و دامنه ۰/۱ تا ۹۲۸/۷ h^{-1} قرار داشت که نشان‌دهنده وضعیت نامناسب تنفس میکروبی و آنزیم فسفاتاز اسیدی بود. بر پایه مرور منابع انجام‌شده برای دیگر ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی حد بحرانی یافت نشد. آلوس دکاسترو لوپس و همکاران (۲۰۱۳) بیان داشتند برخلاف ویژگی‌های شیمیایی مرتبط با حاصلخیزی خاک که برای آن‌ها حد بحرانی به‌خوبی تعریف‌شده‌اند، برای بسیاری از ویژگی‌های زیستی حد بحرانی‌ها تعیین و تفسیر نشده‌اند.

جمعیت میکروبی خاک (مانند قارچ و باکتری) به‌عنوان قسمت فعال کربن آلی خاک بسیار بهتر از کل مواد آلی به تغییر مدیریت واکنش نشان می‌دهد (اندرسون و دمش، ۱۹۸۹). در خاک‌های مطالعه شده جمعیت باکتری خاک (TB) در دامنه ۷ تا $8/9 \log \text{ cfu/g}$ با میانگین $7/7 \log$ و جمعیت قارچ خاک (TF) در دامنه $3/7$ تا $5/3 \log$ با میانگین

ویژگی‌های خاک تعیین شد. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) استفاده شد.

تهیه نقشه

ساختار مکانی ویژگی‌های خاک به همراه SQI با استفاده از مدل نیم‌تغییرنما ارزیابی شدند. نیم‌تغییرنما به غیرفرمال بودن حساس است، از بین ویژگی‌هایی که توزیع فراوانی نرمال نداشتند، با استفاده از تبدیل لگاریتمی نرمال شدند. برای تعیین بهترین مدل نیم‌تغییرنمای برازش داده‌شده (کروی، نمایی، گوسی، خطی و اثر قطعه‌ای خالص) از آماره‌های مجموع مربعات باقیمانده (RSS) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. برای تهیه نقشه در مواردی که متغیرها دارای ساختار مکانی بودند از کریجینگ معمولی و برای ویژگی‌های فاقد ساختار مکانی مشخص از روش وزن دهی عکس فاصله^۵ (IDW) استفاده شد. برای ارزیابی صحت نقشه‌های تهیه‌شده از آماره‌های میانگین خطا^۰ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شد. هراندازه آماره ME به صفر نزدیک‌تر باشد اریب برآورد کمتر است و آماره NRMSE به کمیت^۰ تا ۱۰، ۱۱ تا ۲۰، ۲۱ تا ۳۰ و ۳۱ و بزرگ‌تر به ترتیب نشان‌دهنده برآورد قوی، مناسب، متوسط و ضعیف توسط مدل‌های درون‌یابی است (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱). برای ارزیابی ساختار مکانی از نرم‌افزار GS+ (نسخه ۵) و برای تهیه نقشه از نرم‌افزار ArcGIS (نسخه ۱۰/۲) استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی

آمار توصیفی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در (جدول ۲) نشان داده شدند. خاک‌های مطالعه شده کلاس‌های بافتی به نسبت سنگین (با میانه رس و سیلت ۴۴ درصد) داشتند. بافت خاک با تشکیل یک بیوسفر مناسب برای میکروارگانیسم‌هایی که پتانسیل بهبود تنوع و

(جدول ۲). pH به‌عنوان قوی‌ترین متغیر توصیفی برای غنای جمعیت باکتری خاک است (ترات و همکاران، ۲۰۱۷؛ گریفیتس و همکاران، ۲۰۱۱)، بنابراین ضریب تغییرات جمعیت کل باکتری و قارچ در این مطالعه نیز به تبعیت از pH دارای تغییرات کم بودند. pH شرایط فیزیکی خاک را تعیین و تنوع و ترکیب جمعیت‌های میکروبی را در خاک کنترل می‌کند و یا تغییر می‌دهد (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۹، روسک و همکاران، ۲۰۱۰) تا جایی که پیش‌بینی تنوع باکتریایی در مقیاس بزرگ، تنها بر اساس داده‌های pH ممکن است (گریفیتس و همکاران، ۲۰۱۶).

همبستگی ویژگی‌های مطالعه شده

ضریب همبستگی خطی بین متغیرهای مطالعه شده در (جدول ۳) نشان داده شد. تنفس میکروبی با جمعیت کل باکتری‌ها و به دنبال آن با جمعیت گونه‌های باکتری سودوموناس (P) و ازتوباکتر (A) نیز دارای همبستگی خطی معنی‌دار بودند (جدول ۲). همبستگی تنفس میکروبی با جمعیت کل قارچ ضعیف و غیر معنی‌دار بود. به نظر می‌رسد به علت زیاد بودن واکنش خاک ($pH > 7.3$) و غیر اسیدی بودن محیط، جمعیت قارچ در خاک‌های مطالعه شده زیاد نباشد. از سوی دیگر تنفس میکروبی دارای همبستگی معنی‌دار با آنزیم فسفاتاز اسیدی بود. به نظر می‌رسد کربن آلی خاک نقش مهمی در افزایش فعالیت این آنزیم (آباس، ۲۰۲۱؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۱۷) و تنفس میکروبی (اولدفیلد و همکاران، ۲۰۱۸) داشته باشد.

کربن آلی خاک در میان ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی بیشترین همبستگی معنی‌دار را با آنزیم فسفاتاز اسیدی ($r = 0.63$) و پس از آن با تنفس میکروبی ($r = 0.6$) داشت. کمپیل و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که غلظت کربن آلی محلول خاک با تولید میکروبی و/یا تجزیه متابولیت‌های خاص پیوند دارد. فعالیت فسفاتاز اسیدی به‌شدت با محتوای مواد آلی همبستگی مثبت دارد و افزایش آن در خاک‌های غنی از مواد آلی اتفاق می‌افتد (تراسار-سپدا و گیل-استور، ۱۹۸۷). کربن آلی با آنزیم فسفاتاز

cfu/g ۴/۶ قرار داشت. برپایه بررسی انجام‌شده از منابع علمی برای جمعیت باکتری و قارچ حد بحرانی وجود ندارد؛ اما انتظار بر این است که در خاک‌های با pH نزدیک به ۷ با مقدار رس و کربن آلی بیشتر، مقدار آن زیاد باشد (اوبرین و همکاران، ۲۰۱۹؛ روسک و همکاران، ۲۰۱۰). خاک‌های مطالعه شده بر پایه واکنش خاک pH (دامنه ۷/۳ تا ۸/۱ با میانگین ۷/۶) خنثی تا به نسبت قلیا بودند. بر پایه حد بحرانی ۲ درصد (اندرسون، ۲۰۰۳)، آماره میانه کربن آلی خاک‌های مطالعه شده (۱/۱ درصد) نشان داد که بیشتر این خاک‌ها دچار کمبود کربن آلی بودند.

آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی (AIP) نقش مهمی در چرخه فسفر در خاک دارند و به‌عنوان شاخص‌های بالقوه حاصلخیزی خاک معرفی می‌شوند (داس و ورما، ۲۰۱۱). این آنزیم‌ها در خاک‌های مطالعه شده به ترتیب دارای میانه ($\mu\text{g p. g}^{-1}\text{soil h}^{-1}$) ۶۱۱ و ۳۳۳۲ بودند. آنزیم فسفاتاز اسیدی در خاک‌های مطالعه شده در دامنه ($\mu\text{g p. g}^{-1}\text{soil h}^{-1}$) ۳۲ تا ۳۶۴۸ قرار داشت. بر پایه حد بحرانی $\mu\text{g p. g}^{-1}\text{soil h}^{-1}$ ۱۱۵۰ (آلوس دکاسترو لوپس و همکاران، ۲۰۱۳) بسیاری از خاک‌ها دچار کمبود این آنزیم بودند.

آماره ضریب تغییرات (CV) معیاری از شدت غیریکنواختی در ویژگی‌های مطالعه شده است. این آماره بدون بعد است و از این رو می‌تواند برای مقایسه شدت غیریکنواختی در ویژگی‌های مختلف استفاده شود. بر پایه گروه‌بندی وایلدینگ و درس (۱۹۸۳) متغیرهایی با CV کمتر از ۱۵ درصد دارای تغییرات کم، متغیرهایی با CV بین ۱۵ تا ۳۵ درصد دارای تغییرات متوسط و متغیرهایی با CV بیش از ۳۵ درصد دارای تغییرات زیاد هستند. ویژگی‌های زیستی و بیوشیمیایی زیست‌توده میکروبی و فسفاتاز اسیدی به همراه ویژگی‌های شیمیایی هدایت الکتریکی (EC)، فسفر و آهن قابل‌استفاده، دارای CV زیاد بودند. زیاد بودن CV می‌تواند نشان‌دهنده حساسیت این ویژگی‌ها نسبت به عوامل محیطی و مدیریتی باشد.

کمترین ضریب تغییرات مربوط به pH (۱/۹)، جمعیت کل قارچ (۴/۴) و جمعیت کل باکتری (۴/۷) بود

pH بیشترین همبستگی معنی‌دار منفی را با جمعیت گونه‌های سودوموناس و ازتوباکتر داشت. حضور ازتوباکتر در خاک توسط pH کنترل می‌شود به طوری که pH بهینه برای فعالیت ازتوباکتر ۷/۵ - ۷ است (آسفار و همکاران، ۲۰۲۱). در خاک‌های مطالعه شده این pH در دامنه ۷/۳ تا ۸/۱ قرار داشت (جدول ۲)، بنابراین نتیجه همبستگی منفی pH با این پارامتر در این تحقیق نشان‌دهنده آن است که pHهای بزرگ‌تر از بهینه، جمعیت ازتوباکتر را کم می‌کند.

عناصر غذایی خاک به‌ویژه عناصر کم‌مصرف با تنفس میکروبی و فسفاتاز اسیدی همبستگی معنی‌داری نشان دادند. در این میان نقش روی نسبت به سایر عناصر کم‌مصرف برجسته‌تر بود. علاوه بر تنفس میکروبی و فسفاتاز اسیدی، روی همبستگی معنی‌داری با جمعیت باکتری و قارچ نشان داد. سینگ و وایشناو (۲۰۲۱) نشان دادند که ترشح پروتون و آزادسازی لیگاندهای کلات از طریق سیستم‌های اکسیداسیون - احیا در میکروارگانیسم‌ها در استفاده از عناصر کم‌مصرف مؤثر است.

قلیایی نیز همبستگی مثبت داشت که مشابه با یافته‌های لیانگ و همکاران (۲۰۱۷) و مارگالف و همکاران (۲۰۱۷) بود.

کربن زیست‌توده میکروبی به‌طور طبیعی یک تا پنج درصد از کربن آلی خاک (OC) را تشکیل می‌دهد (اسپارلینگ، ۱۹۹۲). در این مطالعه بین این دو متغیر همبستگی ضعیف و غیر معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳) که نشان‌دهنده شرایط نامناسب در فرآیندهای متابولیکی میکروبی خاک بود.

آنزیم اوره‌آز همبستگی منفی با جمعیت گونه‌های ازتوباکتر داشت. کاهش فعالیت اوره‌آز در اثر افزایش جمعیت ازتوباکتر شاید به دلیل تقبل ایفای نقش بیشتر در تثبیت نیتروژن توسط ازتوباکتر باشد.

سیلت بیشترین همبستگی معنی‌دار را با جمعیت سودوموناس و ازتوباکتر نشان داد. سیتون و همکاران (۲۰۲۰) بر پایه نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از دامنه وسیعی از زیستگاه‌های معتدل اقیانوسی (مانند زراعی، علفزار، جنگل‌های مخروطی و برگ‌ریز، خارزار و در مجموع ۳۳۵ مکان) نشان دادند که بافت خاک (به‌ویژه ذرات سیلت و رس) بر ترکیب جمعیت باکتری‌ها به‌ویژه شاخه سودومونادوتا تأثیر معنی‌دار دارد.

جدول ۲ - توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌های منطقه مورد مطالعه

TN	Zn	Cu	Fe	Mn	AP	AK	OC	EC	pH	TNV	Clay	Silt	AIP	AcP	UA	MR	MBC	A	P	TF	TB	
۰/۱	۰/۱۰۰	۰/۹	۴/۳	۳/۹	۲	۱۷۵	۰/۷	۰/۳	۷/۳	۰/۴	۲۸	۳۴	۲۶۹	۳۱/۸	۲۴/۵	۰/۰۱	۱۴۰	۴	۵	۳/۷	۷	کمینه
۰/۳	۱/۲	۳	۱۹	۱۷/۳	۲۹/۶	۶۲۰	۲/۶	۲/۷	۸/۱	۵۰/۴	۵۸	۵۸	۴۹۱۳	۳۶۴۹	۵۹	۰/۲	۹۳۳	۷/۳	۸/۳	۵/۳	۸/۹	بیشینه
۰/۱	۰/۵	۱/۷	۹/۶	۹/۴	۹/۹	۳۵۱	۱/۳	۱/۲	۷/۶	۲۴/۱	۴۳/۹	۴۵/۲	۲۹۵۳	۹۲۹	۳۲/۳	۰/۱	۴۹۸	۶/۱	۶/۵	۴/۶	۷/۷	میانگین
۰/۱	۰/۵	۱/۷	۸/۸	۹	۸/۶	۳۴۰	۱/۱	۱/۱	۷/۶	۲۵/۳	۴۴	۴۴	۳۳۳۲	۶۱۱	۲۹/۹	۰/۱	۴۶۹	۶/۱	۶/۵	۴/۶	۷/۶	میانه
۰/۰۱	۰/۲	۰/۳	۳/۵	۲/۵	۵/۹	۸۶/۵	۰/۴	۰/۵	۰/۱	۸/۴	۵/۶	۵/۸	۹۸۵/۶	۹۵۳	۶/۷	۰/۰۲	۱۹۴	۰/۶	۰/۶	۰/۲	۰/۴	انحراف معیار
۱/۲	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۱/۴	۰/۴	۱/۲	۰/۵	۰/۹	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۸	۱/۹	۱/۹	۱/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۱	۰/۵	۱/۲	چولگی
۱	۱	۱/۹	۰/۳	۰/۹	۱/۹	۰/۲	۱	۰/۲	۲/۱	۱/۸	۰/۹	۰/۶	۰/۳	۲/۵	۳/۶	۳/۸	۰/۵	۱/۲	۰/۹	۴/۲	۱/۶	کشیدگی
۳۴/۹	۳۹/۱	۱۹/۲	۳۶/۶	۲۶/۴	۵۹/۹	۲۴/۶	۳۵/۲	۴۲/۲	۱/۹	۳۴/۸	۱۲/۸	۱۲/۸	۳۳/۴	۱۰۲/۶	۲۰/۶	۳۵/۴	۳۸/۹	۱۰	۸/۵	۴/۴	۴/۷	ضریب تغییرات (%)

اختصارات: جمعیت کل باکتری؛ TB؛ جمعیت کل قارچ؛ TF؛ جمعیت گونه‌های باکتری سودوموناس؛ P؛ جمعیت گونه‌های باکتری ازتوباکتر؛ A؛ زیست توده میکروبی؛ MBC؛ تنفس میکروبی؛ MR؛ فعالیت آنزیم اوره‌آز؛ UA؛ فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی؛ AcP؛ فعالیت آنزیم فسفاتاز قلبایی؛ AIP؛ مواد خنثی شونده؛ TNV؛ کربن آلی؛ OC؛ پتاسیم در دسترس؛ AK؛ فسفر در دسترس؛ AP؛ نیتروژن کل؛ TN

مجموعه داده‌های حداقل (MDS)

پیش از استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، برای تعیین MDS نخست سودمندی آن ارزیابی شد. مقدار ضریب KMO^6 در این مطالعه ۰/۶۹۹ و مقدار آماره بارلت χ^2 ۰/۶۹۳ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج نشان داد که PCA می‌تواند در کاهش داده‌ها سودمند باشد (جدول ۴).

نتایج PCA نشان داد که هشت مؤلفه اصلی (PC) با مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک در مجموع ۸۹/۸۳ درصد از واریانس کل جامعه را شرح دادند (جدول ۴). در هر مؤلفه ویژگی‌هایی با بار عاملی بیشتر از ۰/۵ نگه‌داری شدند. در مؤلفه اصلی اول، ویژگی‌های مرتبط با فعالیت‌های متابولیسمی میکروارگانیسم‌ها مانند تنفس میکروبی، آنزیم فسفاتاز اسیدی، کربن آلی به همراه عناصر غذایی پرمصرف خاک (نیترژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌استفاده) و عناصر غذایی کم‌مصرف (روی و منگنز قابل‌استفاده) قرار گرفتند. دو ویژگی اول مرتبط با فعالیت متابولیسمی میکروارگانیسم‌ها، دارای بیشترین همبستگی خطی معنادار با یکدیگر در خاک‌های مطالعه شده بودند (جدول ۳). از سوی دیگر همبستگی خطی این ویژگی‌ها با کربن آلی خاک و عناصر غذایی نیترژن، فسفر، پتاسیم، روی و منگنز معنی‌دار بود (جدول ۳). با توجه به این‌که در این مؤلفه مجموعه‌ای از ویژگی‌های شیمیایی، زیستی و بیوشیمیایی مرتبط به حاصلخیزی خاک قرار داشتند، این مؤلفه انعکاسی از "وضعیت حاصلخیزی خاک"‌های مطالعه شده بود. در مؤلفه دوم، عناصر غذایی کم‌مصرف آهن و مس به همراه رس و سیلت قرار داشتند. بین عناصر غذایی کم‌مصرف آهن و مس همبستگی معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳). این همبستگی می‌تواند نشان‌دهنده تمایل زیاد به جذب این عناصر توسط کانی‌های رس و یا وجود سزکویی‌اکسیدهایی به‌اندازه ذرات رس در این خاک‌ها باشد (لیندسی، ۱۹۷۹).

در مؤلفه سوم، جمعیت باکتری‌های سودوموناس و ازتوباکتر قرار داشتند. این میکروارگانیسم‌ها در فراهمی نیترژن، فسفر و پتاسیم برای گیاه مؤثر هستند از این رو این مؤلفه می‌تواند نشان‌دهنده "جامعه میکروارگانیسم‌های مؤثر در فراهمی عناصر غذایی گیاه" باشد. در مؤلفه چهارم، کربن زیست‌توده میکروبی در کنار کربنات کلسیم معادل و پتاسیم قابل‌استفاده قرار گرفت. در مؤلفه پنجم، ویژگی‌های مرتبط با شوری خاک (pH و EC) قرار داشتند. بین این دو ویژگی همبستگی معنی‌داری ($r = 0/42$) وجود داشت (جدول ۲). در مؤلفه ششم فعالیت آنزیم اوره‌آز و در مؤلفه هفتم، جمعیت کل باکتری‌ها به‌تنهایی قرار گرفتند. در مؤلفه هشتم، جمعیت قارچ‌ها و آنزیم فسفاتاز قلیایی قرار گرفتند. هرچند همبستگی خطی بین این دو متغیر ضعیف و غیر معنی‌دار بود (جدول ۳). چه‌بسا رابطه بین جمعیت قارچ و آنزیم فسفاتاز غیرخطی باشد. کوتو و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند افزایش فسفاتاز قلیایی وابستگی زیادی به فعالیت قارچ‌ها دارد. این شواهد نشان می‌دهد که غیریکنواختی در مکان و زمان توزیع آنزیم‌ها در خاک (اسپون و کازیاکف، ۲۰۱۳) از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تحقیقات فسفاتازها در خاک است (مارگالف و همکاران، ۲۰۱۷).

از ۲۲ ویژگی خاک مطالعه شده ۱۲ ویژگی در MDS گزینش شدند که در این میان پنج ویژگی آنزیم اوره‌آز، ازتوباکتر، جمعیت کل باکتری، فسفاتاز اسیدی و تنفس میکروبی مربوط به ویژگی‌های زیستی خاک بودند که نشان از سهم بیشتر این ویژگی‌ها نسبت به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در MDS بودند. این در حالی است که تنها در تعداد محدودی از مطالعات کیفیت خاک، از ویژگی‌های زیستی خاک در تعیین MDS استفاده شده است (تیان و همکاران، ۲۰۲۲؛ رئیس، ۲۰۱۷).

جدول ۴- ضرایب هشت مؤلفه اصلی استخراج‌شده از ۲۲ ویژگی خاک، مقادیر ویژه و میزان اشتراک فردی و تجمعی واریانس کل برای هر ویژگی خاک‌های منطقه مورد مطالعه

میزان اشتراک واریانس	مؤلفه اصلی								متغیر
	PC8	PC7	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1	
۰/۷۶۷	۰/۵۴۸								TF
۰/۶۰۳		۰/۷۴۱							TB
۰/۷۵۵						۰/۸۳۶			P
۰/۸۳۲						۰/۸۷۶			A
۰/۴۵۷					۰/۵۷۲				MBC
۰/۸۳۴								۰/۱۶۸	MR
۰/۷۱۳			۰/۷۵۸						UA
۰/۷۸۵								۰/۵۵۵	AcP
۰/۷۷۹	۰/۱۴۷								AIP
۰/۷۳۹							۰/۶۱۶		Silt
۰/۷۷۷							۰/۷۷۳		Clay
۰/۷۷۷					۰/۱۳۰				TNV
۰/۷۰۱				۰/۶۵۷					pH
۰/۷۳۲				۰/۷۷۶					EC
۰/۸۷۹								۰/۶۷۰	OC
۰/۸۱۲					۰/۵۷۷			۰/۶۰۲	K
۰/۶۱۶								۰/۵۱۲	P
۰/۸۷۷								۰/۱۳۸	Mn
۰/۷۱۹							۰/۱۲۷		Fe
۰/۸۵۱							۰/۷۴۵		Cu
۰/۸۰۷								۰/۱۹۵	Zn
۰/۸۱۹								۰/۶۷۰	TN
	۱/۴۴	۱/۶۰	۱/۸۱	۱/۸۴	۲/۱۵	۲/۳۸	۲/۹۱	۳/۵۶	مقدار ویژه
	۳/۴۶	۴/۷۱	۵/۸۹	۷/۵۳	۹/۵۵	۱۰/۴۲	۱۶/۶۹	۲۵/۶۴	درصد واریانس
	۸۹/۸۳	۸۰/۴۳	۷۵/۷۲	۶۸/۸۳	۶۲/۳۰	۵۲/۷۵	۴۲/۳۳	۲۵/۶۴	درصد تجمعی

الف- چرخش در ۱۰ تکرار همگرا شد. روش: چرخش واریانس با نرمال‌سازی کایسر

ب- بارهای عامل پرنج شده (۰/۵۰) دارای وزن بالا در نظر گرفته می‌شوند.

پ- ویژگی‌های خاک پرنج شده و خط کشیده شده در MDS وارد شده‌اند.

اختصارات: جمعیت کل باکتری: TB؛ جمعیت کل قارچ: TF؛ جمعیت گونه‌های باکتری سودوموناس: P؛ جمعیت گونه‌های باکتری ازتوباکتر: A؛ زیست‌توده میکروبی: MBC؛ تنفس میکروبی: MR؛ فعالیت آنزیم

اوره‌از: UA؛ فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی: AcP؛ فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی: AIP؛ مواد خنثی شونده: TNV؛ کربن آلی: OC؛ پتاسیم در دسترس: AK؛ فسفر در دسترس: AP؛ نیتروژن کل: TN

شاخص کیفیت خاک

از متغیرهای به‌دست‌آمده از MDS برای تعیین شاخص کیفیت خاک استفاده شد. مؤلفه‌های ساختار مکانی، بهترین مدل نیم‌تغییرنما به همراه آماره‌های صحت برازش آن‌ها در (جدول ۵) مشخص شدند. بر پایه طبقه‌بندی کمباردلا و همکاران (۱۹۹۴) نسبت همبستگی مکانی کمتر از ۰/۲۵، ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ و بزرگ‌تر از ۰/۷۵ به ترتیب نشان‌دهنده ساختار مکانی قوی، متوسط و ضعیف است. متغیرهای جمعیت کل باکتری، هدایت الکتریکی، روی و منگنز از مدل نیم‌تغییرنمای اثر قطعه‌ای پیروی کرد که نشان‌دهنده فقدان ساختار مکانی و وجود تغییرات تصادفی است. دیگر متغیرهای زیرمجموعه MDS از مدل نیم‌تغییرنمای دارای سقف (کروی، نمایی و گوسی) پیروی کردند، اما به‌غیر از کرنات کلسیم معادل (TNV)، ساختار

مکانی آن‌ها ضعیف تا متوسط بود. فقدان ساختار مکانی قوی در بیشینه متغیرهای MDS می‌تواند به دلایل متعددی از جمله نظام زراعی آبی و دیم، کاربری اراضی، تفاوت واحدهای فیزیوگرافی، مدیریت زراعی و کودی متفاوت، برهمکنش و تأثیرپذیری متغیرها از یکدیگر نسبت داده شود که سبب تضعیف ساختار مکانی و چیره شدن تغییرات تصادفی در متغیرها می‌شوند. برای متغیرهایی که از مدل نیم‌تغییرنمای اثر قطعه‌ای پیروی کردند در پهنه‌بندی از روش درون‌یابی وزن دهی عکس فاصله و برای متغیرهایی که از مدل نیم‌تغییرنمای دارای آستانه پیروی کردند از روش کریجینگ معمولی استفاده شد. برای تعیین شاخص کیفیت خاک متغیرهای MDS نخست با استفاده از توابع تبدیل خطی و غیرخطی کمیت‌ها به دامنه صفر تا یک تبدیل شد. نوع تابع تبدیل برای امتیازدهی ویژگی‌های منتخب در (جدول ۵) مشخص شدند.

جدول ۵- مؤلفه‌های ساختار مکانی و بهینه‌بندی ویژگی‌های خاک MDS در منطقه مورد مطالعه

ساختار مکانی				نوع تابع امتیازدهی	واحد	متغیر
مجموع مربعات خطا (RSS)	ضریب تبیین (R ²)	نسبت همبستگی مکانی (C ₀ /(C ₀ +C))	مدل نیم تغییر نما			
۳/۳۱×۱۰ ^{-۳}	۰/۶۳	۰/۶	کروی	بیشتر بهتر	Log cfu. ml ⁻¹	A
۶/۸۳×۱۰ ^{-۴}	۰/۰۰۱	۰/۹۹۴	اثر قطعه‌ای	بیشتر بهتر	Log cfu. ml ⁻¹	TB
۳/۸۹×۱۰ ^{-۴}	۰/۸۰	۰/۶۲۵	کروی	بیشتر بهتر	mg CO ₂ . kg ⁻¹ soil day ⁻¹	MR
۳/۸۷×۱۰ ^{-۴}	۰/۸۶	۰/۶۸	نمایی	بیشتر بهتر	μg PNP. g ⁻¹ soil h ⁻¹	AIP
۹/۹۴×۱۰ ^{-۶}	۰/۵۹	۰/۵	کروی	بیشتر بهتر	mg N-NH ₄ ⁺ kg ⁻¹ soil 2hr ⁻¹	UA
۱۰/۸	۰/۹۶۷	۰/۲۹۶	کروی	بهینه بهتر	%	Clay
۱۳/۱	۰/۹۹۰	۰/۰۲۱	نمایی	کمتر بهتر	%	TNV
۰/۰۳۶	۰/۰۰۰	۱	اثر قطعه‌ای	کمتر بهتر	dS m ⁻¹	EC
۱/۰۱	۰/۹۸۳	۰/۵۶۲	گوسی	بیشتر بهتر	mg kg ⁻¹	Fe
۶/۷۰۱×۱۰ ^{-۵}	۰/۰۳۴	۰/۹۶۳	اثر قطعه‌ای	بیشتر بهتر	mg kg ⁻¹	Zn
۱/۶۸۱×۱۰ ^{-۵}	۰/۸۶۶	۰/۶۳۱	نمایی	بیشتر بهتر	mg kg ⁻¹	Cu
۰/۹۵۵	۰/۴۰۰	۱	اثر قطعه‌ای	بیشتر بهتر	mg kg ⁻¹	Mn
۱/۸۸۳×۱۰ ^{-۵}	۰/۹۱۵	۰/۳۱۷	نمایی	بیشتر بهتر	-	SQI

اختصارات: جمعیت گونه‌های باکتری از تو باکتر: A؛ جمعیت کل باکتری: TB؛ تنفس میکروبی: MR؛ فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی: AIP؛ فعالیت آنزیم اوره‌آز: UA؛ مواد خنثی شونده: TNV؛ شاخص کیفیت خاک خطی: SQI

و می‌تواند وضعیت کیفیت خاک را در ناحیه مطالعه شده بهتر نشان دهد. از سویی دیگر ضریب تبیین دو روش SQI (L) با SQI (NL) قوی و معنی‌دار بود (شکل ۲). از این رو از شاخص کیفیت خاک خطی در ناحیه مطالعه شده استفاده شد.

خلاصه آمار توصیفی شاخص کیفیت خاک به هر دو روش خطی و غیرخطی به همراه آنالیز حساسیت در (جدول ۶) نشان داده شدند. شاخص کیفیت خاک به روش خطی حساسیت بیشتری (۲/۰۱) نسبت به روش غیرخطی (۱/۹۲) داشت. این یافته نشان می‌دهد که شاخص SQI (L) نسبت به تغییرات مدیریتی یا تخریب خاک حساس‌تر بوده

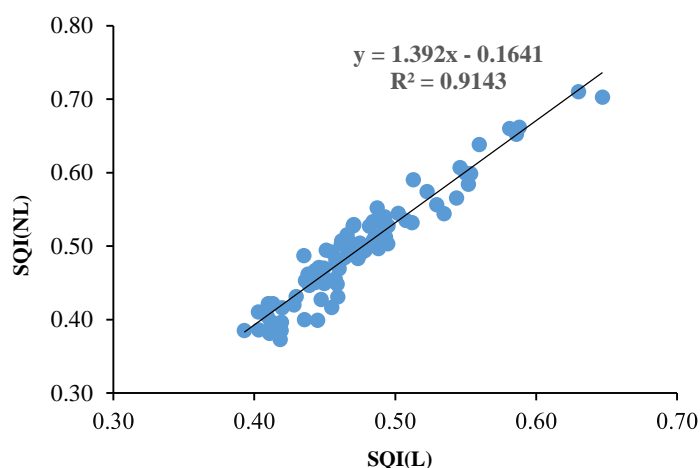
جدول ۶- خلاصه آمار توصیفی شاخص‌های کیفیت خاک و حساسیت آن‌ها در ناحیه مطالعه شده

حساسیت (SA)	انحراف معیار	بیشینه	میانگین	کمینه	شاخص کیفیت خاک (SQI)
۲/۰۱	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۴۷	۰/۳۲	شاخص کیفیت خاک به روش خطی (SQI (L))
۱/۹۲	۰/۰۶۸	۰/۷۱	۰/۴۹	۰/۳۷	شاخص کیفیت خاک به روش غیرخطی (SQI (NL))

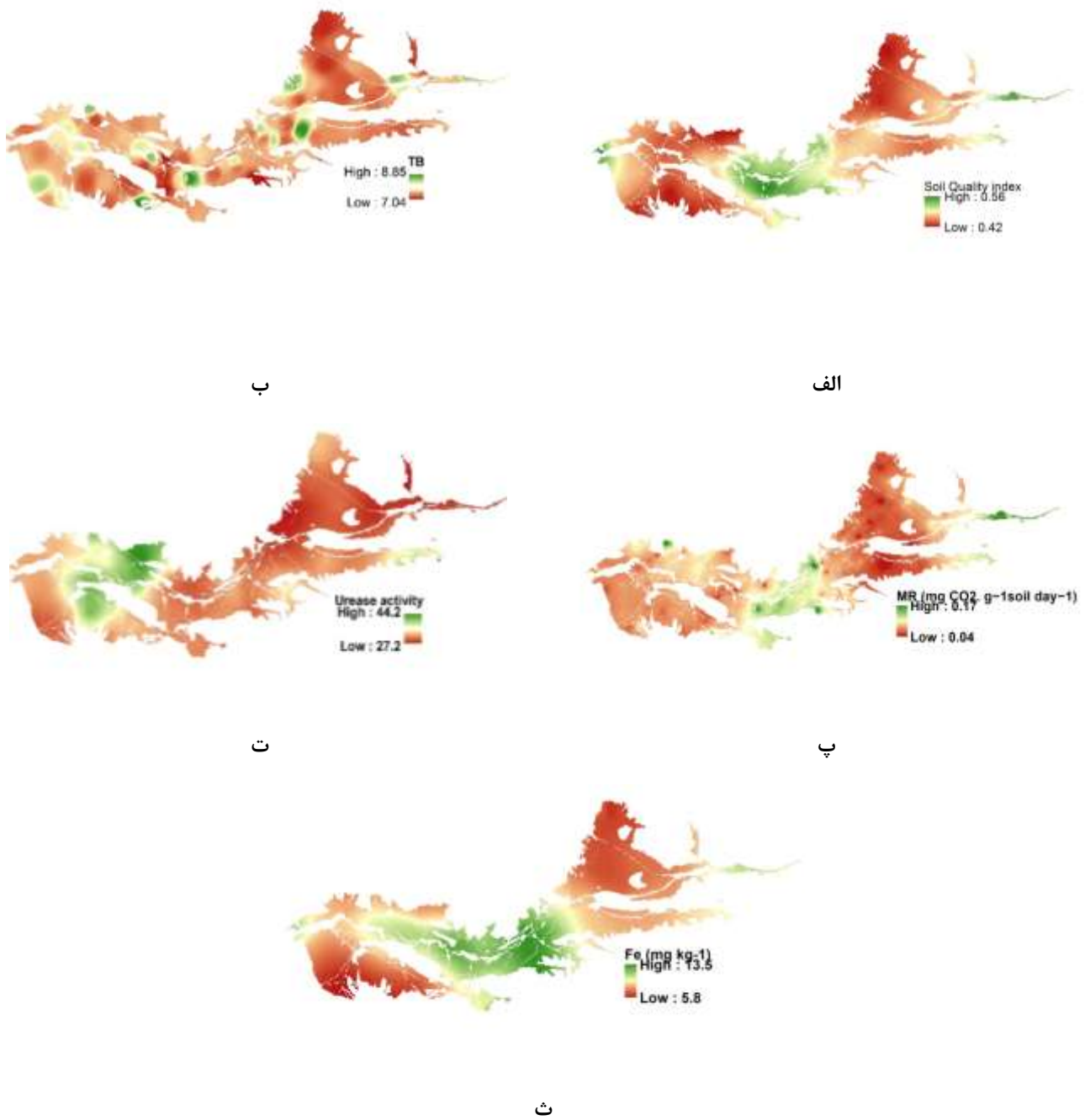
خاک و تنفس میکروبی در بخش میانی ناحیه مطالعه شده بیشتر بود. هرچه فعالیت میکروبی بیشتر باشد به دنبال آن تنفس میکروبی در خاک نیز افزایش می‌یابد. تنفس با محتوای کربن آلی خاک به‌عنوان منبع انرژی میکروبی و با جمعیت کل میکروبه‌های خاک مرتبط است (الفیاتی و همکاران، ۲۰۱۹؛ کلمن و همکاران، ۲۰۰۴).

باکتری‌ها به‌ویژه گونه‌های سودوموناس ممکن است انواعی از سیدروفورها را تولید کنند که دسترسی آهن را در شرایط محدودکننده آهن افزایش می‌دهد (کالیا و همکاران، ۲۰۲۰). این یافته‌ها نشان‌دهنده تأثیرپذیری زیاد کیفیت خاک از ویژگی‌های زیستی در ناحیه مطالعه شده بود و نشان داد که هرچند نمونه‌برداری، آماده‌سازی و اندازه‌گیری ویژگی‌های زیستی دشوار است اما نمی‌توان از نقش آن‌ها در کیفیت خاک چشم پوشید.

توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک و برخی ویژگی‌های مؤثر در مجموعه MDS که به‌ویژه از تشابه مکانی بیشتری برخوردار بودند در (شکل ۳) نشان داده شد. کی و همکاران (۲۰۰۹) اعلام کردند که مقادیر SQI بزرگ‌تر از ۰/۷۸ نشان‌دهنده بیشترین تناسب برای رشد گیاه است. در خاک‌های مطالعه شده چنین کیفیتی مشاهده نشد اما در بخش‌های میانی مقدار SQI بیشتر از دیگر نواحی بود. از سوی دیگر توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک از محدوده‌های اراضی آبی (شکل ۱) و دیم پیروی نکرد، اما مقایسه کیفیت خاک با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک نشان داد که بیشترین شباهت کیفیت خاک با ویژگی‌های زیستی خاک از جمله جمعیت کل باکتری، تنفس میکروبی، فعالیت آنزیم اوره‌آز و بعدازآن ویژگی‌های آهن قابل‌استفاده است (شکل ۳). کمیت شاخص کیفیت



شکل ۲- رگرسیون بین شاخص کیفیت خاک (SQI) محاسبه‌شده با استفاده از روش خطی (L) و غیرخطی (NL) برای خاک‌های منطقه مورد مطالعه



شکل ۳- توزیع مکانی SQI (ME = -۰/۰۰۵ و NRMSE = ۱۳)، (الف)، جمعیت کل باکتری (ME = ۰/۰۰۱ و NRMSE = ۴/۹)، (ب)، تنفس میکروبی (ME = ۰/۰۰۳ و NRMSE = ۳۰) و فعالیت آنزیم اوره‌آز (ME = -۰/۰۰۴)، (پ)، فعالیت آنزیم اوره‌آز (ME = -۰/۰۰۳ و NRMSE = ۱۹/۹) (ت) و آهن قابل استفاده (ME = ۰/۰۰۳ و NRMSE = ۳۱) (ث)

نتیجه‌گیری کلی

هرچند از ویژگی‌های زیستی خاک به علت سختی و گرانی اندازه‌گیری، در مطالعات کیفیت خاک کمتر استفاده شده است، اما ورود پنج ویژگی زیستی خاک در MDS در این مطالعه اهمیت مشارکت این ویژگی‌ها در تعیین کیفیت خاک را نشان داد.

توزیع مکانی شاخص کیفیت خاک و ویژگی‌های MDS نشان‌دهنده تأثیرپذیری شدید کیفیت خاک از ویژگی‌های زیستی بود. ویژگی‌های زیستی با وارد شدن در MDS به نظر می‌رسد نقش مهمی در کیفیت و حاصلخیزی خاک منطقه مطالعه شده داشته باشند. این یافته نشان می‌دهد که در ارزیابی کیفیت خاک، بهبود حاصلخیزی خاک و مدیریت تغذیه گیاه، نمی‌توان نقش ویژگی‌های زیستی خاک را نادیده گرفت. از سویی دیگر این یافته‌ها نشان دادند SQI، به‌عنوان یک رویکرد مبتنی بر دانش باقابلیت دسترسی و

انعطاف‌پذیری می‌تواند اطلاعات بیشتری برای تصمیم‌سازی ارتقای حاصلخیزی خاک و مدیریت تغذیه گیاه نسبت به هریک از ویژگی‌های انفرادی اندازه‌گیری شده در مقیاس ناحیه‌ای در اختیار کارشناسان و بهره‌برداران قرار دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان از موسسه تحقیقات خاک و آب کشور (SWRI) سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO) برای حمایت مالی در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی رادارند. نویسندگان مراتب تشکر صمیمانه خود را از سرکار خانم دکتر بهاره دلسوز خاکی برای کمک‌های ایشان در انجام آنالیزهای آماری و همچنین از سرکار خانم‌ها مهندس خدیجه اربابی و اکرم اوتادی در موسسه تحقیقات خاک و آب، برای همکاری ایشان در انجام آزمایشات زیستی ابراز می‌دارند.

فهرست منابع

۱. افتخاری، ک. ۱۳۹۷. شناسایی و تفکیک واحدهای همگن بر مبنای خصوصیات خاک، تیپ‌های کاربری اراضی و وضعیت کمی و کیفی منابع آب در زیر حوضه هنام. گزارش نهایی طرح، شماره ۵۵۲۲۱، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، ایران.
۲. امامی، ح.، آستارایی، ع. و فتوت، ا. ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر مواد آلی بر توابع نمره دهی کیفیت خاک. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع غذایی). جلد ۲۸ (شماره ۳)، ۵۶۵-۵۷۴.
۳. مشیری، ف.، خادمی، ز.، سعادت، س.، رشیدی، ن.، سدري، م.، ح.، غیبی، م.، سماوات، س.، اسدی رحمانی، ه.، طهرانی، م.، فیضی اصل، و.، خوگر، ز.، کشاورز، پ. و شهابی، ع. ا. ۱۳۹۳. دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گندم. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، ایران. ۸۴ صفحه.

4. Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., Meftah Kadmiri, I. 2021. Nitrogen fixing Azotobacter species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Frontiers in microbiology*, 12: 628379.
5. Abas, A. 2021. A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators*, 121: 107197.
6. Abraham, J.S., Sripoorna, S., Dagar, J., Jangra, S., Kumar, A., Yadav, K., Singh, S., Goyal, A., Maurya, S., Gambhir, G. 2019. Soil ciliates of the Indian Delhi Region: Their community characteristics with emphasis on their ecological implications as sensitive bio-indicators for soil quality. *Saudi Journal of Biological Sciences* 26: 1305-1313.

7. Andrews, S.S., Carroll, C.R. 2001. Designing a Soil Quality Assessment Tool for Sustainable Agroecosystem Management. *Ecological Applications*, 11: 1573-1585.
8. Andrews, S.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., 2004. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1945–1962.
9. Alef, K., Nannipieri, P. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press.
10. Alves de Castro Lopes, A., Gomes de Sousa, D.M., Chaer, G.M., Bueno dos Reis Junior, F., Goedert, W.J., de Carvalho Mendes, I. 2013. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal* 77: 461-472.
11. Anderson, T.-H. 2003. Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 98: 285-293.
12. Anderson, T.-H., Domsch, K.H. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil biology and biochemistry*, 21: 471-479.
13. Bandyopadhyay, S., Maiti, S.K. 2021. Application of statistical and machine learning approach for prediction of soil quality index formulated to evaluate trajectory of ecosystem recovery in coal mine degraded land. *Ecological Engineering*, 170: 106351.
14. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5: 1085-1121.
15. Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karalan, D. L., Turco, R. F., Konopka, A. E. 1994. Field Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501-1511.
16. Campbell, T.P., Ulrich, D.E., Toyoda, J., Thompson, J., Munsky, B., Albright, M.B., Bailey, V.L., Tfaily, M.M., Dunbar, J. 2022. Microbial Communities Influence Soil Dissolved Organic Carbon Concentration by Altering Metabolite Composition.
17. Chandel, S., Hadda, M., Mahal, A. 2018. Soil quality assessment through minimum data set under different land uses of submontane Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49: 658-674.
18. Coleman, M.D., Friend, A.L., Kern, C.C. 2004. Carbon allocation and nitrogen acquisition in a developing *Populus deltoides* plantation. *Tree Physiology*, 24: 1347-1357.
19. Das, S.K., Varma, A., 2010. Role of enzymes in maintaining soil health, *Soil enzymology*. Springer, pp. 25-42.
20. Delgado, A., Gómez, J.A. 2016. The soil. Physical, chemical and biological properties, *Principles of agronomy for sustainable agriculture*. Springer, pp. 15-26.
21. Ebrahimi, M., Sarikhani, M.R., Shiri, J. 2022. Application of artificial neural network and gene expression programming to estimate soil microbial metabolic quotient. *Applied Soil Ecology* 175, 104465.
22. Elfiati, D., Susilowati, A., Rachmat, H.H. 2019. Microbes Population and Soil Respiration Under The Kemenyan (*Styrax spp*) Stand Rhizosphere. *KnE Engineering*, 75–84.
23. Fathizad, H., Ardakani, M.A.H., Heung, B., Sodaiezadeh, H., Rahmani, A., Fathabadi, A., Scholten, T., Taghizadeh-Mehrjardi, R. 2020. Spatio-temporal dynamic of soil quality in the central Iranian desert modeled with machine learning and digital soil assessment techniques. *Ecological Indicators*, 118, 106736.
24. Gee, G., Bauder, J. 1986. Particle-size analysis. p. 383–411. A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison*,

- WI. Particle-size analysis. p. 383–411. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
25. Geisseler, D., Horwath, W.R. 2009. Short-term dynamics of soil carbon, microbial biomass, and soil enzyme activities as compared to longer-term effects of tillage in irrigated row crops. *Biology and Fertility of Soils*, 46: 65-72.
 26. Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M., Seoane, S. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil biology and biochemistry*, 37: 877-887.
 27. Griffiths, R.I., Thomson, B.C., James, P., Bell, T., Bailey, M., Whiteley, A.S. 2011. The bacterial biogeography of British soils. *Environmental microbiology*, 13: 1642-1654.
 28. Griffiths, R.I., Thomson, B.C., Plassart, P., Gweon, H.S., Stone, D., Creamer, R.E., Lemanceau, P., Bailey, M.J. 2016. Mapping and validating predictions of soil bacterial biodiversity using European and national scale datasets. *Applied Soil Ecology*, 97: 61-68.
 29. Guo, L., Sun, Z., Ouyang, Z., Han, D., Li, F., 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena*, 152: 135-143.
 30. Guo, L.B., Gifford, R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global change biology*, 8: 345-360.
 31. Hanson, P.J., Walker, A.P. 2020. Advancing global change biology through experimental manipulations: Where have we been and where might we go? *Global change biology*, 26: 287-299.
 32. Hartman, W.H., Richardson, C.J. 2013. Differential nutrient limitation of soil microbial biomass and metabolic quotients (qCO₂): is there a biological stoichiometry of soil microbes? *PloS one* 8, e57127.
 33. Hayat, W., Khan, S., Hayat, M.T., Pervez, R., Ahmad, S., Iqbal, A. 2021. The effect of deforestation on soil quality in Lesser-Himalayan community forests of Abbottabad, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 14: 1-14.
 34. Helmke, P., Spark, D. 1996. Potassium, P 551-574. *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI.
 35. Hessari, B., Oweis, T. 2021. Conjunctive use of green and blue water resources in agriculture: Methodology and application for supplemental irrigation. *Irrigation and Drainage*, 70: 1193-1208.
 36. Horwath, W., Paul, E. 1994. Microbial biomass. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Microbiological and Biochemical Properties*, 5: 753-773.
 37. Jahn, R., Blume, H., Asio, V., Spaargaren, O., Schad, P. 2006. *Guidelines for soil description*. FAO.
 38. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4): 337-350.
 39. Jia, X., Zhong, Y., Liu, J., Zhu, G., Shangguan, Z., Yan, W., 2020. Effects of nitrogen enrichment on soil microbial characteristics: From biomass to enzyme activities. *Geoderma*, 366, 114256.
 40. Kalia, A., Sharma, S.P., Kaur, S., Kaur, H. 2020. Bacterial inoculants: how can these microbes sustain soil health and crop productivity?, *Soil health*. Springer, pp. 337-372.
 41. Kutu, F.R., Mokase, T., Dada, O., Rhode, O. 2019. Assessing microbial population dynamics, enzyme activities and phosphorus availability indices during phospho-compost production. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8: 87-97.
 42. Liang, X., Jin, Y., He, M., Liu, Y., Hua, G., Wang, S., Tian, G., 2017. Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237: 173-180.

43. Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons Ltd.
44. Lindsay, W.L., Norvell, W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil science society of America journal*, 42: 421-428.
45. Liu, S., Wang, J., Pu, S., Blagodatskaya, E., Kuzyakov, Y., Razavi, B.S. 2020. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis. *Science of the Total Environment*, 745, 141003.
46. Margalef, O., Sardans, J., Fernández-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D. 2017. Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7: 1-13.
47. Masto, R., Chhonkar, P., Purakayastha, T., Patra, A., Singh, D. 2008. Soil quality indices for evaluation of long-term land use and soil management practices in semi-arid sub-tropical India. *Land degradation & development*, 19: 516-529.
48. Maurya, S., Abraham, J.S., Somasundaram, S., Toteja, R., Gupta, R., Makhija, S. 2020. Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1-22.
49. Meena, A., Rao, K. 2021. Assessment of soil microbial and enzyme activity in the rhizosphere zone under different land use/cover of a semiarid region, India. *Ecological Processes*, 10: 1-12.
50. Milani, P.M., Eftekhari, K., Fatehi, S., Sepahvand, M., Turkelboom, F., De Pauw, E., Bruggeman, A. 2010. Semi-detailed soil surveys of Merek and Honam watersheds, Karkheh river basin, Iran. ICARDA, Aleppo, Syria. vi.
51. Moran-Rodas, V.E., Chavannavar, S.V., Joergensen, R.G., Wachendorf, C. 2022. Microbial response of distinct soil types to land-use intensification at a South-Indian rural-urban interface. *Plant and Soil*, 473: 389-405.
52. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Moradian, S. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological indicators*, 83: 482-494.
53. Negiş, H., Şeker, C. 2020. Estimation of soil quality of under long term sugar beet-wheat cropping system by factor analysis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51: 440-455.
54. Nehrani, S.H., Askari, M.S., Saadat, S., Delavar, M.A., Taheri, M., Holden, N.M. 2020. Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological Indicators*, 108, 105770.
55. Niemeyer, J.C., Lolata, G.B., de Carvalho, G.M., Da Silva, E.M., Sousa, J.P., Nogueira, M.A. 2012. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. *Applied Soil Ecology*, 59: 96-105.
56. Norfleet, M., Ditzler, C., Puckett, W., Grossman, R., Shaw, J. 2003. Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Science*, 168: 149-155.
57. O'Brien, F.J., Almaraz, M., Foster, M.A., Hill, A.F., Huber, D.P., King, E.K., Langford, H., Lowe, M.-A., Mickan, B.S., Miller, V.S. 2019. Soil salinity and pH drive soil bacterial community composition and diversity along a lateritic slope in the Avon River critical zone observatory, Western Australia. *Frontiers in microbiology*, 10, 1486.
58. Oldfield, E.E., Wood, S.A., Bradford, M.A. 2018. Direct effects of soil organic matter on productivity mirror those observed with organic amendments. *Plant and Soil*, 423: 363-373.
59. Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture.
60. Peltzer, D.A., Wardle, D.A., Allison, V.J., Baisden, W.T., Bardgett, R.D., Chadwick, O.A., Condon, L.M., Parfitt, R.L., Porder, S., Richardson, S.J. 2010. Understanding ecosystem retrogression. *Ecological Monographs*, 80: 509-529.

61. Pouladi, N., Jafarzadeh, A.A., Shahbazi, F., Ghorbani, M.A., Greve, M.H. 2020. Assessing the soil quality index as affected by two land use scenarios in Miandoab region. *SN Applied Sciences*, 2: 1-11.
62. Pourhemmat, J. 2012. Water resources of the Karkheh River basin: hydrology, runoff, and water balance. Aleppo, Syria: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).
63. Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149: 325-334.
64. Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314: 122-137.
65. Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological indicators*, 75: 307-320.
66. Raiesi, F., Salek-Gilani, S. 2020. Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. *Land Degradation & Development*. 31, 1533-1544.
67. Rezaei, S.A., Gilkes, R.J., Andrews, S.S. 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136: 229-234.
68. Rhoades, J. 1983. Soluble salts. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9: 167-179.
69. Rinot, O., Levy, G.J., Steinberger, Y., Svoray, T., Eshel, G. 2019. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Science of the Total Environment*, 648: 1484-1491.
70. Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P.C., Lauber, C.L., Lozupone, C., Caporaso, J.G., Knight, R., Fierer, N. 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME journal*, 4: 1340-1351.
71. Rowell, D.L. 2014. *Soil science: Methods & applications*. Routledge.
72. Roy, D., Datta, A., Jat, H., Choudhary, M., Sharma, P., Singh, P., Jat, M. 2022. Impact of long term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India. *Geoderma*, 405, 115391.
73. Sage, R.F. 2020. *Global change biology: A primer*. *Global Change Biology*, 26: 3-30.
74. Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R. 2012. *Methods in soil biology*. Springer Science & business media.
75. Scrimgeour, C. 2008. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Edited by MR Carter and EG Gregorich. Boca Raton, FL, USA: CRC Press (2008), pp. 1224, £85.00. ISBN-13: 978-0-8593-3586-0. *Experimental agriculture*, 44: 437-437.
76. Seaton, F.M., George, P.B., Lebron, I., Jones, D.L., Creer, S., Robinson, D.A. 2020. Soil textural heterogeneity impacts bacterial but not fungal diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 144, 107766.
77. Shao, G., Ai, J., Sun, Q., Hou, L., Dong, Y. 2020. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological indicators*, 115, 106439.
78. Singh, H.B., Vaishnav, A. 2021. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier.
79. Siwik-Ziomek, A., Brzezinska, M., Lemanowicz, J., Koper, J., Szarlip, P. 2018. Biological parameters in technogenic soils of a former sulphur mine. *International Agrophysics*, 32 (2): 237-245.
80. Sparling, G.P. 1992. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Soil Research*, 30: 195-207.

81. Spohn, M., Carminati, A., Kuzyakov, Y. 2013. Soil zymography—a novel in situ method for mapping distribution of enzyme activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 58: 275-280.
82. Staff, S. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.
83. Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B., Orgiazzi, A., Creamer, R. 2016. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied Soil Ecology*, 97: 12-22.
84. Tavakoli, A.R., Oweis, T., Ashrafi, S., Asadi, H., Siadat, H., Liaghat, A. 2010. Improving rainwater productivity with supplemental irrigation in upper Karkheh river basin of Iran. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.
85. Terrat, S., Horrigue, W., Dequiedt, S., Saby, N.P., Lelièvre, M., Nowak, V., Tripied, J., Régnier, T., Jolivet, C., Arrouays, D. 2017. Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLoS one* 12, e0186766.
86. Tian, Y., Xu, Z., Wang, J., Wang, Z. 2022. Evaluation of Soil Quality for Different Types of Land Use Based on Minimum Dataset in the Typical Desert Steppe in Ningxia, China. *Journal of Advanced Transportation* 2022.
87. Trasar-Cepeda, M.C., Gil-Sotres, F. 1987. Phosphatase activity in acid high organic matter soils in Galicia (NW Spain). *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 281-287.
88. Umer, M.I., Rajab, S.M., Ismail, H.K. 2020. Effect of CaCO₃ form on soil inherent quality properties of calcareous soils, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, pp. 459-467.
89. Usharani, K., Roopashree, K., Naik, D. 2019. Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8: 1256-1267.
90. Vasu, D., Singh, S.K., Ray, S.K., Duraisami, V.P., Tiwary, P., Chandran, P., Nimkar, A.M., 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.
91. Wang, M., Markert, B., Shen, W., Chen, W., Peng, C., Ouyang, Z. 2011. Microbial biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 18: 958-967.
92. Wardle, D. 1992. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological reviews*, 67: 321-358.
93. Waswa, B.S., Vlek, P.L., Tamene, L.D., Okoth, P., Mbakaya, D., Zingore, S. 2013. Evaluating indicators of land degradation in smallholder farming systems of western Kenya. *Geoderma*, 195: 192-200.
94. Wilding, L.P., Drees, L.R. 1983. Spatial variability and pedology. *Concepts and interactions*, 83-116.
95. Yao, R., Yang, J., Gao, P., Zhang, J., Jin, W. 2013. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil and Tillage Research*, 128: 137-148.
96. Yu, P., Liu, S., Zhang, L., Li, Q., Zhou, D. 2018. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*, 616: 564-571.
97. Zhao, Q., Tang, J., Li, Z., Yang, W., Duan, Y. 2018. The influence of soil physico-chemical properties and enzyme activities on soil quality of saline-alkali agroecosystems in western Jilin Province, China. *Sustainability*, 10, 1529.
98. Evaluation of the role of biological properties in the soil quality of Hanam sub-basin of Lorestan province

Evaluation of the role of biological properties in the soil quality of the Hanam sub-basin of Lorestan province

A. Esmailizad, R. Shokri, N. Davatgar, and H. Kari Dolatabad

Soil Biology and Biotechnology Research Department, SWRI: noblesse55@gmail.com
Microbiology Department, Biology Research Center, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.
rsh.bio42@gmail.com

Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO),
Karaj, Iran: n_davatgar@yahoo.com

Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO),
Karaj, Iran: hossein.kari@gmail.com

Received: June 28, 2023, and Accepted: November 29, 2023

Abstract

The application of soil quality (SQ) in sustainable land management is evolving. However, despite their considerable importance, the inclusion of biological properties in soil quality assessments is limited due to the challenges and high costs associated with measuring these attributes. This study was carried out on the contribution of biological properties to soil quality. In this research, 22 physical, chemical, and biological properties of 90 surface soil samples (0-30 cm) were analyzed to determine the soil quality index (SQI) in the Honam region of Lorestan. Analyzed properties included pH, electrical conductivity (EC), organic carbon (OC), total neutralizing value, clay and silt content, microbial biomass carbon (MBC), basal microbial respiration (MR), the total fungal and bacterial populations, the populations of *Azotobacter* and *Pseudomonas* species, as well as the activities of urease, acid and alkaline phosphatase, the available potassium and phosphorus concentrations, the total nitrogen, and the content of manganese, iron, copper, and zinc. Principal component analysis (PCA) to select a minimum data set (MDS) revealed that eight principal components, each with eigenvalues greater than one, accounted for 89.83% of the total variance. Of the 22 soil properties 12 were selected for the MDS, with biological properties (5 properties) making a more significant contribution than the physical and chemical properties. The spatial distribution of the SQI underlines the significant influence of biological properties on soil quality. These results underline the importance of including biological properties in the assessment of soil quality.

Keywords: Biological properties; Irrigated and rainfed land; Soil quality