

تعیین حداقل ویژگی های موثر برای ارزیابی کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم دیم در دشت

قروه

چکیده

کیفیت خاک به عنوان یکی از مؤلفه های اساسی در پایداری تولید محصولات کشاورزی نقش مهمی در مدیریت بهینه اراضی و افزایش بهره وری دارد. پژوهش حاضر با هدف تعیین حداقل ویژگی های مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک و مقایسه کارایی سه شاخص کیفیت خاک شامل شاخص تجمعی ساده (SQIa)، شاخص تجمعی وزنی (SQIw) و شاخص نمودار (NQI) در اراضی گندم دیم دشت قروه انجام شد. بدین منظور، نمونه های خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی متری مزارع برداشت و ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک اندازه گیری شد. با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه های اصلی (PCA) شش ویژگی درصد شن، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد سیلت، اسیدیته خاک، کربن آلی و پتاسیم قابل دسترس به عنوان مجموعه حداقل ویژگی های مؤثر (MDS) انتخاب شدند، سپس شاخص های کیفیت خاک در قالب مجموعه کل داده ها (TDS) و مجموعه حداقل داده ها (MDS) محاسبه و ارتباط آنها با عملکرد محصول ارزیابی گردید. نتایج نشان داد همبستگی معنی داری ($p < 0.01$) بین عملکرد گندم دیم و شاخص های کیفیت خاک وجود دارد. در حالت کاربرد MDS بیشترین ضریب تبیین مربوط به شاخص تجمعی وزنی ($R^2 = 0.775$)، و سپس شاخص های نمودار ($R^2 = 0.67$) و تجمعی ساده ($R^2 = 0.63$) بود؛ الگوی مشابهی نیز در حالت TDS با مقادیر ضریب تبیین کمتر (به ترتیب ۰/۷، ۰/۶۱ و ۰/۵۱) مشاهده شد. بنابراین شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی توانایی بیشتری در تبیین تغییرات عملکرد دارد. همچنین استفاده از MDS به دلیل همبستگی بیشتر، کاهش هزینه ها و تعداد ویژگی ها، کارآمدتر از TDS ارزیابی شد و کیفیت خاک اراضی در منطقه در کلاس ضعیف (IV) درجه بندی شد.

واژه های کلیدی: شاخص کیفیت خاک، تحلیل مؤلفه های اصلی، مجموعه حداقل داده ها، مدیریت پایدار خاک

مقدمه

گندم به عنوان راهبردی ترین محصول زراعی جهان، نقشی حیاتی در تأمین امنیت غذایی و انرژی مورد نیاز جامعه بشری ایفا می کند. در مناطق خشک و نیمه خشک، بخش عمده ای از تولید این محصول استراتژیک متکی بر زراعت دیم است. با این حال، پایداری تولید در اراضی دیم به شدت تحت تأثیر کیفیت خاک و توانایی آن در حفظ رطوبت و تأمین عناصر غذایی قرار دارد (Bhaduri et al., 2022; Liu et al., 2025). خاک به عنوان یکی از حیاتی ترین اجزای پایداری زیست بوم، نقشی کلیدی در تحقق توسعه پایدار و مدیریت بهینه منابع طبیعی دارد (Dominati et al., 2010). ارزیابی کیفیت خاک از طریق اندازه گیری ویژگی هایی که به عنوان شاخص های کیفیت خاک شناخته می شوند، صورت می گیرد (Toledo et al., 2013; Raiesi, 2017; Wang et al., 2023). این شاخص ها، مجموعه ای از خصوصیات قابل اندازه گیری هستند که ظرفیت خاک را برای تولید محصول یا عملکرد زیست محیطی تحت تأثیر قرار داده و به تغییر کاربری اراضی، مدیریت یا عملیات حفاظتی حساس می باشند (Bunemann et al., 2018). نظر به افزایش فشارهای بهره برداری از اراضی و آسیب پذیری خاک های کشاورزی، توسعه یک روش مناسب برای ارزیابی کیفیت خاک به منظور دستیابی به مدیریت پایدار و پیش بینی خطرات تخریب خاک ضروری است (Armenise et al., 2013; Sione et al., 2017; Bunemann et al., 2018). از میان روش های مختلف ارزیابی کیفیت خاک می توان کیت آزمایش (Dexter, 2004)، روش های شاخص کیفیت خاک (Doberman 1997) (and Oberthur, 2004) و روش های کریجینگ چند متغیره (Council Research National, 1993) و تغییرات پویای مدل های کیفیت خاک^۴

1 Test kit

2 Soil quality indicator methods

3 Multivariate Kriging Methods

4 Dynamic changes in soil quality models

(Karlen et al., 2008) را نام برد که در این بین رویکرد شاخص کیفیت خاک به دلیل انعطاف پذیری، کمی بودن و مناسب بودن آن برای انواع مختلف خاک و همچنین امکان تلفیق ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی خاک بیشترین کاربرد را دارد (متین فر و همکاران، ۱۳۹۸) در همین راستا، ارزیابی‌های متعددی در سطح بین‌المللی و داخلی صورت گرفته است؛ به‌طوری‌که (Li et al., 2019) در پژوهشی در چین، ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، متغیرهای ماده آلی، نیتروژن کل، نیتروژن قابل هیدرولیز قلیایی و روی قابل دسترس را به‌عنوان مجموعه حداقل داده‌ها انتخاب نموده و نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص کیفیت تجمعی در سه سطح عملکرد بالا، متوسط و پایین گندم به‌ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۴۸ و ۰/۳۹ بود و شاخص کیفیت خاک همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد با عملکرد گندم داشت در پژوهشی دیگر، (Dengiz et al., 2020) به ارزیابی کیفیت خاک اراضی در ترکیه پرداختند. ویژگی فیزیکی و شیمیایی را اندازه‌گیری کرده و نتایج نشان داد که ۲۵ درصد از نمونه‌ها دارای کیفیت خاک ضعیف و ۷۵ درصد دارای کیفیت متوسط برای کشت چای بودند. همچنین (Isong et al., 2022) در نایجریه، ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها شاخص کیفیت خاک را بر اساس دو رویکرد کل داده‌ها و حداقل داده‌ها محاسبه و نتایج نشان داد که کلاس کیفیت خاک خوب (بیش از ۴۹ درصد) و کلاس کیفیت خاک متوسط (بیش از ۱۴ درصد) در تمامی مدل‌های پیش‌بینی بر منطقه مورد مطالعه غالب بود. در پژوهش‌های داخلی نیز کریمی و همکاران (۱۴۰۱) با هدف ارزیابی شاخص کیفیت خاک باغ‌های پسته در سطوح مختلف ژئومورفیک در دو بخش خاک سطحی و کل خاک‌رخ، به بررسی تأثیر کیفیت خاک بر عملکرد پسته در یلایای بجنستان پرداختند. مجموعه حداقل داده‌ها در این تحقیق با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی انتخاب و نتایج نشان داد که هم در لایه سطحی و هم در کل خاک‌رخ، شاخص کیفیت خاک وزنی مقادیر بالاتری را نسبت به شاخص تجمعی ساده به خود اختصاص داد و شاخص وزنی ارتباط مطلوبی با عملکرد پسته نشان داد.

با این حال، در بیشتر ارزیابی‌های داخلی گذشته، تنها به بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسنده شده است (سلمان‌پور، ۱۴۰۳) در صورتی‌که ارزیابی جامع کیفیت خاک نیازمند شاخصی است که منعکس‌کننده اثر همزمان و برهم‌کنش این ویژگی‌ها باشد. از سوی دیگر، برخی از پژوهش‌های پیشین یا در مقیاس‌های بسیار کوچک انجام شده‌اند (بی‌دست و گلچین، ۱۴۰۴)، یا از تعداد اندک نمونه‌های خاک بهره گرفته‌اند (Rahmanipour et al., 2014) و یا صرفاً بر سیستم‌های کشت آبی متمرکز بوده‌اند (میرخانی و همکاران، ۱۴۰۲). خلاصه تحقیقاتی مهم دیگر این است که در این پژوهش‌ها، کمی‌سازی روابط بین شاخص‌های کیفیت خاک با عملکرد واقعی محصول به‌ویژه در اراضی دیم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که بر پایه پژوهش‌های موجود، نمی‌توان از یک مجموعه ثابت از شاخص‌ها برای تمامی مناطق استفاده نمود (Brejda et al., 2000) ارزیابی بومی کیفیت خاک در هر منطقه ضرورتی انکارناپذیر است. مرور این پیشینه‌ها نشان می‌دهد که اگرچه رویکرد شاخص کیفیت خاک و روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به طور گسترده‌ای توسعه یافته‌اند، اما خلاصه تحقیقاتی آشکار، کم‌توجهی به رفتار مدل‌های کیفی در شرایط کمبود شدید برخی متغیرهای حیاتی (مانند کربن آلی) در پهنه‌های وسیع دیم‌کاری است. علاوه بر این، در خصوص کارایی همزمان شاخص‌های تجمعی ساده وزنی و نمورو در کالیبراسیون با عملکرد واقعی گندم دیم در خاک‌های آهکی، توافق نظر جامعی وجود ندارد. دشت قروه در استان کردستان به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید گندم دیم در غرب کشور، در سال‌های اخیر با چالش‌های اقلیمی متعددی مواجه بوده است که منجر به زوال ساختار فیزیکی و کاهش حاصلخیزی خاک‌های دیم منطقه شده است. شکاف تحقیقاتی موجود، عدم تطابق مدل‌های ارزیابی کیفیت خاک با واقعیت‌های عملکردی کشاورزان در شرایط دیم است؛ به‌طوری‌که تاکنون مشخص نشده است آیا کاهش متغیرها به یک مجموعه حداقل داده از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی، توانایی تبیین و پیش‌بینی عملکرد گندم دیم را در یک ساختار خاکی دیم حفظ می‌کند یا خیر. بنابراین، ارزیابی همزمان کارایی شاخص‌های تجمعی (ساده و وزنی) و نمورو بر اساس عملکرد واقعی کشاورزان در این پهنه دیم‌کاری، یک ضرورت پژوهشی حل‌نشده برای دستیابی به پایداری تولید است. پژوهش حاضر با هدف رفع خلأهای تحقیقاتی فوق در اراضی دیم دشت قروه، فرضیه‌ها و محورهای نوآورانه زیر را دنبال می‌کند:

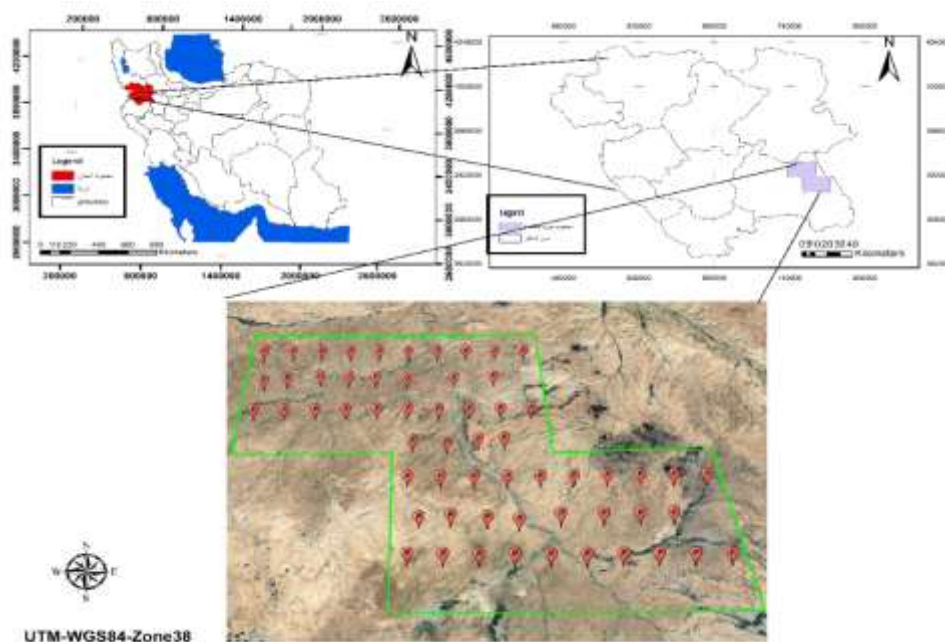
- **کالیبراسیون و مقایسه همزمان الگوریتم‌های ریاضی:** ارزیابی و مقایسه همزمان کارایی سه شاخص کیفیت خاک شامل شاخص تجمعی ساده، شاخص تجمعی وزنی و شاخص نمورو بر پایه متغیرهای کلیدی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک.
- **اعتبارسنجی با عملکرد واقعی مزارع:** مدل‌سازی و پایش سلامت خاک بر اساس ارتباط مستقیم و رگرسیونی شاخص‌ها با عملکرد واقعی و میدانی گندم دیم در مقیاس مزارع بومی (به‌جای اتکا به داده‌های ایستگاهی یا تئوریک).
- **ارزیابی کارایی رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها در برابر مجموعه کل داده‌ها:** آزمون این فرضیه که آیا رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها ضمن حذف نویزهای آماری و کاهش چشمگیر هزینه‌های آزمایشگاهی، می‌تواند دقت و حساسیت بالاتری را نسبت به مجموعه کل داده‌ها در پیش‌بینی عملکرد غلات دیم ارائه دهد یا خیر.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه با مساحتی حدود ۶۰ هزار هکتار در شرق استان کردستان و در حوزه آبخیز رودخانه شور بین طول‌های ۵۲° ۳۸' تا ۵۴° ۰۶' و عرض‌های ۳۵° ۰۲' تا ۳۵° ۳۰' شمالی قرار دارد. بر اساس روش آمبرژه، منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد با میانگین بارندگی سالانه ۳۲۰ میلی‌متر است (شکل-۱)؛ به‌طوری‌که بخش عمده نزولات جوی در فصول زمستان و بهار رخ می‌دهد. ارتفاع پایین‌ترین و بلندترین نقطه منطقه به‌ترتیب ۱۹۲۰ و ۳۲۴۰ متر از سطح دریا و میانگین دمای سالیانه ۱۱/۴ درجه سلسیوس است (آمارنامه اداره کل هواشناسی استان کردستان، ۱۴۰۲). خاک‌های این منطقه از پتانسیل زراعی بالایی برخوردار بوده و بیش از پنج دهه است که تحت عملیات زراعی گسترده، به‌ویژه کشت غلات قرار دارند و هرساله مقادیر قابل‌توجهی کودهای شیمیایی و آلی جهت حفظ باردهی آن‌ها مصرف می‌شود. به منظور بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در گندمزارهای دیم دشت قروه، در سال زراعی ۱۴۰۲ تعداد ۶۰ نمونه خاک سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) بر اساس ویژگی‌های همگن محیطی برداشت شد. از آنجا که محدوده مورد مطالعه صرفاً به مزارع کشت گندم دیم اختصاص دارد از نظر نوع مدیریت زراعی سیستمی کاملاً یکنواخت است؛ با این حال، پراکنش نقاط نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شد که واحدهای اصلی خاک و فیزیوگرافی دشت قروه را به‌طور کامل پوشش دهند. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و آماده‌سازی آن‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد: درصد شن، درصد سیلت و درصد رس به روش (Gee and Or, 2002)، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش استوانه فلزی (Black and Hartage, 1986)، ویژگی‌های شیمیایی شامل هدایت الکتریکی عصاره اشباع به وسیله EC سنج، اسیدیته گل اشباع به وسیله pH سنج، درصد کربن آلی به روش (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Page et al., 1982)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Sparks et al., 1996)، ازت کل از روش کج‌دال (Jones, 2001) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال (Page et al., 1982).

اندازه‌گیری عملکرد محصول و تحلیل‌های آماری

اندازه‌گیری عملکرد دانه‌ای گندم دیم در اواخر فصل رشد با استفاده از روش پلات‌اندازی (کوادرات ۱×۱ متر) در اطراف نقاط نمونه‌برداری خاک انجام شد (Hume and Shirriff, 1995). پیش از انجام تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی کیفیت خاک، فرض نرمال بودن توزیع متغیرها بر اساس مقادیر چولگی و کشیدگی در نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

شناسایی مجموعه حداقل داده

برای شناسایی ویژگی‌های مناسب جهت توسعه شاخص کیفیت خاک از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی استفاده شد. روش تجزیه به مولفه‌های اصلی روی مقادیر استاندارد شده ویژگی‌های اجرا شد (Askari and Holden, 2015). مولفه‌های با ارزش ویژه بزرگتر از یک برای انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های موثر در نظر گرفته شد (Askari and Holden, 2015; Hamidi Nehrani et al., 2020) و جهت افزایش قابلیت تفسیر داده‌ها، چرخش واریماکس بر روی مولفه‌های انتخاب شده انجام شد. در هر مولفه اصلی، ویژگی‌های با بار عاملی بالا (۱۰ درصد بالاترین وزن) به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های موثر انتخاب شدند (Askari and Holden, 2015). در صورت انتخاب بیش از یک ویژگی برای هر مولفه، ویژگی‌های با ضرایب همبستگی بالا ($r > 0.7$) و وزن پایین تر حذف شده و در نهایت مهم‌ترین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک تعیین گردید (Nabiollahi et al., 2018). در صورت همبستگی ضعیف بین متغیرها، همگی آن‌ها در هر مولفه به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها مشخص می‌شوند (Vasu et al., 2016).

امتیازدهی و وزن‌دهی به ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک

به دلیل تنوع واحدها و مقیاس‌های متغیرهای اندازه‌گیری شده، به منظور تلفیق آن‌ها در قالب یک شاخص واحد، داده‌ها بی‌بعدسازی شدند. در این فرآیند، محدوده مقادیری از یک ویژگی که مطلوب‌ترین شرایط را برای کیفیت خاک فراهم می‌کند، امتیاز ۱ و نامطلوب‌ترین محدوده، امتیاز صفر دریافت کرد (Liu et al., 2015; Tian et al., 2020). امتیازدهی به مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر اساس ماهیت اثرگذاری آن‌ها بر کارکردهای خاک، در سه گروه به شرح زیر انجام شد:

5 Principal Component Analysis

6 Varimax rotation

الف) توابع واکنش هرچه بیشتر، بهتر: شامل متغیرهایی است که مقادیر بالاتر آن‌ها اثر مثبتی بر بهبود کیفیت خاک دارد؛ در این پژوهش متغیرهای ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل دسترس، پتاسیم قابل دسترس و ظرفیت تبادل کاتیونی در این گروه قرار گرفتند (Nannipieri et al., 1990; Lal, 1994). امتیاز خطی این متغیرها از رابطه (۱) محاسبه شد.

ب) توابع واکنش هرچه کمتر، بهتر: دربرگیرنده متغیرهایی است که مقادیر کمتر آن‌ها کیفیت خاک را ارتقا می‌دهد؛ جرم مخصوص ظاهری، درصد شن، درصد سیلت و کربنات کلسیم معادل (آهک) در این طبقه دسته‌بندی شدند (Biswas et al., 2017; Nakajima et al., 2015) و امتیاز آن‌ها از رابطه (۲) به دست آمد.

ج) توابع واکنش محدوده مطلوب: مشخصه‌هایی را شامل می‌شود که تنها در یک دامنه معین بهترین کارکرد را دارند؛ در این تحقیق اسیدیته (مقدار بهینه ۷)، هدایت الکتریکی (محدوده ۰/۲ تا ۲ دسی‌زیمنس بر متر) و درصد رس (محدوده ۱۵ تا ۲۵ درصد) در این گروه جای گرفتند. (Andrews et al., 2004; Rezaee et al., 2020) برای این ویژگی‌ها، اگر مقدار اندازه‌گیری شده کمتر یا مساوی حد بهینه بود، از الگوریتم «هرچه بیشتر، بهتر» و در صورت فراتر رفتن از حد بهینه، از الگوریتم «هرچه کمتر، بهتر» استفاده شد.

$SL=1-\frac{(x-l)}{(h-l)}$	رابطه (۱)
----------------------------	-----------

$SL=\frac{(x-l)}{(h-l)}$	رابطه (۲)
--------------------------	-----------

SL: تابع خطی بین صفر و یک، x: مقدار متغیر، h: بیشترین مقدار هر متغیر، l: کمترین مقدار هر متغیر سپس با استفاده از این توابع نمره دهی ویژگی‌ها انجام می‌پذیرد. پس از امتیازدهی، جهت تعیین وزن ویژگی‌های خاک از روش تحلیل عاملی و محاسبه واریانس مشترک استفاده شد. در این رویکرد، سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی استخراج گردید و نسبت سهم اشتراک هر ویژگی به مجموع سهم اشتراک‌پذیری کل متغیرها، به‌عنوان وزن اختصاصی آن ویژگی در هر دو مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها برای محاسبه نهایی شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد (Shukla et al., 2006).

محاسبه شاخص‌های کیفیت خاک

پس از اتمام مراحل امتیازدهی خطی و تعیین وزن ویژگی‌ها بر اساس سهم اشتراک‌پذیری، شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از سه الگوریتم ریاضی و در قالب هر دو مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها محاسبه شدند. روابط ریاضی این سه شاخص به شرح زیر است:

۱. شاخص کیفیت تجمعی ساده

این شاخص بر اساس فرض برابری وزن تمامی متغیرهای خاک و از طریق میانگین‌گیری ساده از امتیاز ویژگی‌ها مطابق با رابطه (۳) محاسبه گردید: (Doran and Parkin, 1994)

$SQI_a = \sum Si/Ni$	رابطه (۳)
----------------------	-----------

که در آن، Si امتیاز خطی بی‌بعد شده ویژگی i ام و n تعداد ویژگی‌های موجود در مجموعه داده است.

۲. شاخص کیفیت تجمعی وزنی

در این الگوریتم، شاخص کیفیت خاک از حاصل جمع ضرب امتیاز هر ویژگی در وزن اختصاصی حاصل از سهم اشتراک‌پذیری، مطابق با رابطه (۴) استخراج شد (Karlen et al., 1998; Shukla et al., 2006).

$SQI_w = \sum_{i=1}^n WiSi$	رابطه ۴)
-----------------------------	----------

امتیاز خطی بی‌بعد شده آن ویژگی است Si ام و i وزن تعلق یافته به ویژگی Wi که در آن،

۳. شاخص کیفیت خاک نمورو

$NQI = \sqrt{\frac{savg^2 + smin^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$	رابطه ۵)
---	----------

که در آن $Savg$ میانگین امتیاز خطی بی‌بعد شده ویژگی‌های منتخب برای هر نمونه خاک، $Smin$ کمترین امتیاز ثبت شده در بین ویژگی‌های منتخب برای همان نمونه است n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است (Qi et al., 2009).

درجه بندی شاخص‌های کیفیت خاک

پس از بی‌بعدسازی نشانگرها و اعمال وزن‌های ساختاری حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شاخص‌های کیفیت خاک در قالب سه الگوریتم تجمعی ساده، تجمعی وزنی و نمورو برای هر دو رویکرد مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها محاسبه شد. به منظور تفسیر پدولوژیکی کارکرد اراضی، مقادیر عددی خروجی مدل‌ها بر اساس چارچوب کالیبره شده چی و همکاران (Qi et al., 2009) به پنج کلاس کیفیت متمایز تفکیک گردید. در این متدولوژی، مرزهای ریاضی شاخص‌ها (بین صفر تا یک) بازتاب‌دهنده توان زیست‌محیطی خاک هستند؛ به طوری که مقادیر بهینه و نزدیک به یک در طبقه عالی (Class I) قرار گرفته و با کاهش تدریجی نمرات کمی، اراضی به ترتیب در کلاس‌های متوسط (Class III)، ضعیف و محدودکننده تولید (Class IV) و در نهایت بسیار ضعیف یا تخریب یافته (Class V) زون‌بندی می‌شوند. این مدل درجه‌بندی کیفی-عددی، منای ارزیابی حساسیت الگوریتم‌ها و پایش سقف پایداری عملکرد دانه گندم دیم در مزارع دشت قروه قرار گرفت.

اعتبارسنجی شاخص‌های کیفیت خاک

به منظور ارزیابی کارایی، پایش دقت و اعتبارسنجی شاخص‌های محاسباتی کیفیت خاک در تبیین واقعیت‌های زراعی منطقه، از دو رویکرد تحلیل همبستگی و شاخص حساسیت استفاده شد. در گام نخست، روابط رگرسیونی و ضرایب تبیین بین عملکرد واقعی گندم دیم (به عنوان متغیر وابسته) و هر یک از شاخص‌های کیفیت خاک نمورو، تجمعی ساده و تجمعی وزنی (به عنوان متغیرهای مستقل) در دو حالت مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها استخراج گردید. در گام بعد، برای ارزیابی میزان توانایی و حساسیت هر شاخص در تفکیک کیفیت خاک اراضی منطقه، شاخص حساسیت بر اساس رابطه (۶) محاسبه شد (Masto et al., 2008).

$SI = \frac{SQI_{max}}{SQI_{min}}$	رابطه ۶)
------------------------------------	----------

که در آن، SI شاخص حساسیت، SQImax بیشترین مقدار عددی شاخص و SQImin کمترین مقدار عددی شاخص کیفیت خاک ثبت شده در بین تمامی نمونه‌ها هستند. شایان ذکر است که شاخصی با مقدار SI بالاتر، از کارایی و حساسیت بیشتری برای پایش تغییرات کیفیت خاک در منطقه برخوردار است.

یافته‌های پژوهش

خصوصیات کیفی عمومی خاک‌ها

خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌های منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج، میانگین اسیدیته خاک (۷/۷۵) نشان‌دهنده شرایط خنثی تا کمی قلیایی خاک‌های آهکی منطقه است. بررسی توزیع اندازه ذرات خاک نشان داد که بافت اراضی عمدتاً در کلاس‌های لوم شنی رسی، لوم رسی و لوم قرار دارد که در این میان، کلاس لوم شنی رسی بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده است. میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع (۰/۷۶ دسی‌زیمنس بر متر) بیانگر عدم وجود مشکل شوری و پتانسیل اسمزی محدودکننده در اراضی دیم منطقه است.

با این حال، میانگین کربن آلی خاک بسیار ناچیز و در حدود ۰/۶۵ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده فقر شدید ماده آلی در افق سطحی این اراضی است. میانگین کربنات کلسیم معادل (آهک) در خاک‌های منطقه ۲۰/۲۴ درصد ثبت گردید که در طبقه متوسط تا نسبتاً زیاد قرار می‌گیرد. در میان مؤلفه‌های حاصلخیزی خاک، میانگین مقدار نیتروژن کل (۰/۰۷ درصد) و پتاسیم قابل دسترس (۳۲۲/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کمتر از حد بهینه زراعی برای کشت گندم دیم ارزیابی شد؛ این فقر عنصری مستقیماً با میانگین پایین کربن آلی و پدیده تخلیه عناصر در نظام‌های دیم‌کاری سنتی همخوانی دارد. در مقابل، فسفر قابل دسترس (۱۵/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به دلیل پیشینه کوددهی مزارع در محدوده مطلوب قرار دارد. از سوی دیگر، میانگین عملکرد دانه گندم دیم در مزارع مورد مطالعه ۱/۸۶ تن در هکتار ثبت شد (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). اما با توجه به فقر شدید کربن آلی، بالا بودن جرم مخصوص ظاهری (۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و زوال پایداری ساختاری خاک، پایداری تولید این محصول استراتژیک در بلندمدت به شدت آسیب‌پذیر و متکی بر نوسانات اقلیمی بهار خواهد بود.

اعتبارسنجی داده‌ها برای تحلیل‌های چندمتغیره

پیش از اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی جهت استخراج مجموعه حداقل داده‌ها، بررسی کفایت داده‌ها و ارزیابی ماتریس همبستگی ویژگی‌های خاک با استفاده از آزمون‌های کایزر-مایر-ولکین و کرویت بارتلت الزامی است. نتایج محاسبات آماری نشان داد که مقدار شاخص KMO برابر ۰/۷۲ است؛ با توجه به اینکه مقادیر بالاتر از ۰/۶ بیانگر کفایت مطلوب حجم نمونه‌برداری برای تحلیل‌های عاملی است، صحت نمونه‌برداری ۶۰ نقطه در دشت قروه تأیید می‌شود. علاوه بر این، خروجی آزمون کرویت بارتلت در سطح آماری یک درصد ($p < 0.01$) کاملاً معنی‌دار به دست آمد (جدول ۳). معنی‌دار بودن این آزمون اثبات می‌کند که ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک رویکرد کل داده‌ها، یک ماتریس همانی (صفر) نبوده و روابط متقابل و هم‌خطی معنی‌داری میان نشانگرها برقرار است. وجود این روابط متقابل، پدیده چندبعدی بودن داده‌های خاک را تأیید کرده و توجیه‌کننده استفاده از روش کاهش ابعاد یا همان تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای این اراضی است (Hamidi Nehrani et al., 2020).

جدول ۱. آماره‌های ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی خاک	واحد سنجش	کمینه	پیشینه	میانگین	انحراف معیار
اسیدیته		۷/۱	۸/۲	۷/۷۵	۰/۲۹
شن	%	۱۰	۶۶	۴۸/۹۵	۷/۸

سیلت	%	۱۴	۳۷	۲۳/۲۷	۶/۰۸
رس	%	۱۴	۴۲	۲۷/۷۸	۷/۵۹
هدایت الکتریکی	dS.m ⁻¹	۰/۳۳	۱/۵۶	۰/۷۶	۰/۳۹
کربن آلی	%	۰/۳۳	۰/۹۸	۰/۶۵	۰/۱۶
ظرفیت تبادل کاتیونی	Cmolc. Kg ⁻¹	۳/۸۴	۲۸/۲	۱۷/۴۶	۵/۴۴
نیتروژن کل	%	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۲
فسفر قابل دسترس	mg.kg ⁻¹	۵/۹	۲۲/۴۰	۱۵/۲۹	۴/۹
پتاسیم قابل دسترس	mg.kg ⁻¹	۱۲۵	۵۳۴	۳۲۲/۷۸	۱۰۵/۳
کربنات کلسیم معادل (آهک)	%	۵/۹	۳۴/۳	۲۰/۳۴	۸/۰۹
جرم مخصوص ظاهری	g.cm ⁻³	۱/۱۲	۱/۶۵	۱/۳۷	۰/۱۳

جدول ۲۰. آزمون بار تلت و KMO

نوع آزمون	شاخص آماری	مقدار عددی
کفایت نمونه برداری کایزر-مایر-اولکین	شاخص KMO	۰/۷۲
آزمون کرویت بار تلت	اماره کای اسکوار	۲۲۰/۸۷۸
	درجه آزادی	۲۰
	معنی داری	۰/۰۰۱

انتخاب مؤلفه های اصلی کیفیت خاک و تبیین مجموعه حداقل داده ها

در این مرحله، ۱۲ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی خاک که نسبت به فعالیت های مدیریتی حساس بوده و در باردهی اراضی مؤثر هستند، به عنوان مجموعه کل داده ها وارد تحلیل شدند. به منظور کاهش ابعاد ماتریس داده ها و استخراج نشانگرهای کلیدی، تحلیل مؤلفه های اصلی با چرخش متعامد اجرا شد. جدول (۳) مقادیر ویژه، درصد واریانس و درصد تجمعی واریانس متغیرها را در مؤلفه های مختلف نشان می دهد. بر اساس نتایج، پنج مؤلفه اول که دارای مقدار ویژه بزرگتر از یک بودند، تبیین کننده واریانس کل سیستم بوده و وارد مدل نهایی شدند. در مؤلفه اول ویژگی های درصد شن، درصد رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، بیشترین ضرایب بارگذاری رو به خود اختصاص دادند که اختلاف آنها کمتر از ۱۰ درصد بود. جهت بررسی روابط درونی این متغیرها و انتخاب نماینده کارکردی، آزمون همبستگی پیرسون بین آن ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که بین درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی داری برقرار است ($r=0/65$ - $p < 0/01$) با این حال، به دلیل ماهیت ترکیبی ذرات بافت خاک و وجود همبستگی ذاتی شدید و منفی بین رس و شن، و همچنین با توجه به حضور مستقل درصد سیلت در مؤلفه دوم، به منظور جلوگیری از هم خطی ساختاری و افزایش کاذب وزن فیزیکی بافت خاک در شاخص نهایی، درصد رس از مدل حذف گردید؛ در نتیجه، تنها درصد شن و ظرفیت تبادل کاتیونی به عنوان نمایندگان پدولوژیکی این مؤلفه برگزیده شدند. در مؤلفه های بعدی، متغیرهای واجد شرایط که بالاترین بار عاملی را داشتند به طور مستقیم وارد مجموعه حداقل داده ها شدند؛ به طوری که در مؤلفه دوم درصد سیلت، در مؤلفه سوم اسیدیته خاک، در مؤلفه چهارم کربن آلی خاک و در مؤلفه پنجم پتاسیم قابل دسترس بالاترین ضرایب بارگذاری را کسب نمودند. در نهایت، مجموعه حداقل داده های مؤثر شامل شش ویژگی درصد شن، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد سیلت، اسیدیته خاک، کربن آلی و پتاسیم قابل دسترس تثبیت گردید که ابعاد متغیرهای اولیه را تا ۵۰ درصد کاهش داد. پیش از این، پژوهشگران گوناگون اشاره کرده اند که وجود حداقل ۵ تا ۶

پارامتر کلیدی در مجموعه حداقل داده‌ها برای ارزیابی قابل قبول و پایش کارآمد شاخص کیفیت خاک کفایت می‌کند (Andrews et al., 2004; Karlen et al., 2008).

نکته حائز اهمیت در این تحلیل، عدم ورود متغیر نیتروژن کل به مجموعه حداقل داده‌ها و کسب وزن و بارگذاری نسبتاً کم توسط کربن آلی در مؤلفه‌های اصلی اولیه است. حذف نیتروژن و وزن کم کربن آلی در فرآیند استخراج مؤلفه‌ها هرگز به معنای بی‌اهمیت بودن این دو مؤلفه حیاتی در پایداری زراعت دیم نیست، بلکه این پدیده پدولوژیکی مستقیماً ناشی از یکنواختی شدید مقدار نیتروژن کل و کمبود وسیع، خطی و همگن کربن آلی در مزارع گندم دیم دشت قروه است. از آنجا که واریانس و تغییرات مکانی کربن آلی و نیتروژن در کل منطقه ناچیز و ساختار داده‌ها در این دو ویژگی کاملاً همگن است، الگوریتم ریاضی تجزیه به مؤلفه‌های اصلی قادر به تفکیک خاک‌ها بر اساس واریانس آن‌ها نبوده و متغیرهای فیزیکی و شیمیایی دیگر را ترجیح داده است؛ این امر کاملاً با واقعیت‌های زراعی و چالش‌های حاصلخیزی اراضی دیم منطقه همخوانی دارد.

جدول ۳. مقادیر ارزش ویژه، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده در مؤلفه‌ها

مؤلفه‌ها (Components)	۱	۲	۳	۴	۵
ارزش ویژه (Eigenvalue)	۲/۹۴	۱/۹۷	۱/۸۱	۱/۲۲	۱/۰۵
درصد تجمعی واریانس (Cumulative percent)	۳۴/۵۷	۴۱/۰۶	۵۶/۱۸	۶۶/۳۸	۷۵/۲۰
درصد شن	-۰/۹۱				
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۸۸۴				
درصد رس	۰/۸۲۴				
درصد سیلت		-۰/۸۶۳			
اسیدیته خاک			۰/۸۷۱		
کربن آلی				۰/۶۷۳	
پتاسیم قابل دسترس					۰/۷۷۵

بررسی سهم اشتراک‌پذیری و وزن ویژگی‌های منتخب خاک

مقادیر واریانس مشترک (سهم اشتراک‌پذیری) هر ویژگی حاصل از تحلیل عاملی و وزن‌های محاسباتی آن‌ها برای هر دو رویکرد مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. مقادیر بالای اشتراک‌پذیری (بیش از ۶۰٪) برای اکثر متغیرهای ابقاء‌شده در مجموعه حداقل داده‌ها نشان می‌دهد که فرآیند کاهش ابعاد داده‌ها از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی، بدون از دست رفتن اطلاعات حیاتی و ساختاری خصوصیات خاک انجام شده است. بر اساس متدولوژی استاندارد، وزن اختصاص‌یافته به هر نشانگر در الگوریتم شاخص وزنی، مستقیماً تابع سهم واریانس توجیه‌شده توسط مؤلفه مربوطه است (Andrews et al., 2002). توزیع وزن‌ها در این پژوهش آشکار ساخت که مؤلفه‌های فیزیکی و ساختاری خاک (مانند بافت خاک) در کنار ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی، بالاترین ضرایب وزنی را به خود اختصاص داده‌اند. این الگوی توزیع وزن‌ها به‌وضوح بیانگر آن است که پایداری هیدرولیکی و کارکرد اکوسیستمی خاک‌های آهکی در مناطق نیمه‌خشک، به شدت تحت کنترل روابط متقابل بافت و ماده آلی قرار دارد (Govaerts et al., 2006). تمرکز وزن‌های بالاتر بر روی این متغیرهای در رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها، سبب شده است تا حساسیت و کارایی مدل

در بازتاب پویایی‌های خاک افزایش یابد؛ چرا که این شاخص‌ها بر خلاف ویژگی‌های همگن و کم‌تغییر، واریانس کارکردی سیستم را به طور دقیق‌تری نمایندگی کرده و سوگیری‌های ناشی از متغیرهای موازی را حذف می‌کنند.

جدول ۴. مقادیر وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در روش استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های موثر

ویژگی‌های خاک	کل داده‌ها		حداقل داده‌ها	
	اشتراک پذیری	وزن	اشتراک پذیری	وزن
درصد شن	۰/۹۱۶	۰/۱۰۲	۰/۹۴۵	۰/۲۲۴
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۸۴۵	۰/۰۹۴	۰/۸۴۰	۰/۱۹۹
درصد رس	۰/۹۲۷	۰/۱۰۳		
درصد سیلت	۰/۸۸۹	۰/۰۹۹	۰/۸۱۸	۰/۱۹۴
اسیدیتته خاک	۰/۶۷۷	۰/۰۷۴	۰/۶۴۴	۰/۱۵۳
کربن آلی	۰/۷۷۱	۰/۰۸۵	۰/۴۸۳	۰/۱۱۴
جرم مخصوص ظاهری	۰/۶۷۷	۰/۰۷۵		
نیتروژن کل	۰/۴۶۴	۰/۰۵۱		
فسفر قابل دسترس	۰/۴۸۴	۰/۰۵۴		
پتاسیم قابل دسترس	۰/۸۶۱	۰/۰۹۵	۰/۴۷۸	۰/۱۱۳
آهک	۰/۸۱۲	۰/۰۹۰		
هدایت الکتریکی	۰/۷۰۸	۰/۰۷۸		

بررسی و مقایسه مقادیر عددی شاخص‌های کیفیت خاک در دو حالت مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها

وضعیت و دامنه تغییرات شاخص‌های محاسباتی کیفیت خاک در گندمزارهای دیم دشت قروه با استفاده از سه الگوریتم نمودار، تجمعی ساده و تجمعی وزنی در قالب هر دو رویکرد مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در رویکرد مجموعه کل داده‌ها، دامنه تغییرات شاخص‌های نمودار، ساده و وزنی به‌ترتیب در بازه‌های ۰/۲۲ تا ۰/۵۹، ۰/۲۸ تا ۰/۶۱ قرار داشت. این در حالی است که با به‌کارگیری رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها، دامنه مقادیر برای شاخص‌های مذکور به‌ترتیب به بازه‌های ۰/۲۴ تا ۰/۵۷، ۰/۲۸ تا ۰/۶۸ و ۰/۳۱ تا ۰/۷۸ افزایش یافت. پهن‌تر شدن دامنه تغییرات شاخص‌ها در حالت مجموعه حداقل داده‌ها (به‌ویژه در شاخص وزنی) نشان می‌دهد که حذف متغیرهای هم‌پوشان و همگن که اثر تعدیل‌کننده آماری بر روی خروجی مدل داشتند، سبب آشکار شدن تفاوت‌های ذاتی و پنهان پدولوژیکی مزارع شده و حساسیت مدل را در تفکیک کیفیت اراضی ارتقا داده است. انطباق مقادیر میانگین شاخص‌های محاسباتی با سیستم کلاس‌بندی مرجع نشان داد که اکثریت قاطع اراضی مورد مطالعه (بیش از ۸۰ درصد نقاط) در کلاس کیفی ضعیف (کلاس IV) قرار می‌گیرند و تنها بخش کوچکی از مزارع در کلاس متوسط (کلاس III) توزیع شده‌اند. غلبه همه‌جانبه کلاس کیفی ضعیف در دشت قروه، بازگوکننده پتانسیل محدودکننده شدید این اراضی دیم از نظر مولفه‌های ساختاری و فیزیکی خاک، به‌ویژه تخلیه حاد ذخایر کربن آلی و کاهش حاصلخیزی ذاتی در ریزوسفر گندم

دیم است. وقوع طیف وسیعی از نمرات شاخص کیفیت خاک (بازه ۰/۳۱ تا ۰/۷۸) در یک سیستم کشت دیم با مدیریت ظاهراً یکنواخت، نشان‌دهنده اثرگذاری عمیق پیشینه‌های زراعی متفاوت مزارع (میزان کوددهی سنواری و درصد حفظ بقایای گیاهی در سال‌های گذشته) و همچنین تأثیر ریزتوپوگرافی و موقعیت‌های فیزیوگرافی دشت قروه بر فرآیندهای شستشو، فرسایش و توزیع رطوبت در خاک‌های سطحی است.

ارتباط شاخص‌های کیفیت خاک با عملکرد گندم دیم

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد واقعی گندم دیم در مزارع دشت قروه در جدول (۶) منعکس شده است. بر اساس یافته‌ها، عملکرد گندم دیم با تمامی شاخص‌های کیفیت خاک محاسبه‌شده در قالب هر دو رویکرد مجموعه کل داده‌ها و حداقل داده‌ها، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) نشان داد. نکته حائز اهمیت این است که شدت ضریب همبستگی شاخص‌ها با عملکرد محصول در حالت کاربرد رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها نسبت به رویکرد مجموعه کل داده‌ها در دو شاخص تجمعی وزنی و نمورو مقادیر بالاتری را به خود اختصاص داد. این یافته، همسو با نتایج پژوهش (et al., 2019) Li است که همبستگی معنی‌داری را بین عملکرد گندم دیم و شاخص کیفیت تجمعی وزنی گزارش کردند؛ با این تمایز که ضریب همبستگی به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر (دامنه ۰/۷۱ تا ۰/۸۷) به مراتب قوی‌تر از مقدار گزارش‌شده توسط محققان مذکور ($r = 0.40$) است. بالاتر بودن این شدت ارتباط، بازتاب‌دهنده کارایی عالی و حساسیت بالای نشانگرهای بومی منتخب در بازتاب پتانسیل تولیدی خاک‌های منطقه است.

بالاتر بودن ضرایب همبستگی شاخص‌ها در حالت مجموعه حداقل داده‌ها نسبت به کل داده‌ها اثبات می‌کند که روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با موفقیت توانسته است متغیرهای موازی، هم‌خط و زائد را که به عنوان نویز آماری عمل می‌کردند حذف نموده و ویژگی‌های کلیدی تبیین‌کننده عملکرد را در قالب شش متغیر نهایی حفظ کند. بنابراین، استفاده از رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها در هر سه شاخص مورد بررسی، به دلیل برخورداری از دقت و همبستگی بالاتر و کاهش چشمگیر تعداد متغیرها، زمان و هزینه‌های آزمایشگاهی، رویکردی به‌مراتب کارآمدتر از به‌کارگیری مجموعه کل داده‌ها ارزیابی می‌شود. در این میان، شاخص تجمعی وزنی در حالت مجموعه حداقل داده‌ها با کسب بالاترین ضریب همبستگی ($r = 0.87$)، بیشترین توانایی را در پایش سلامت خاک و پیش‌بینی پایداری تولید گندم دیم در منطقه دارد.

جدول ۵. وضعیت کیفیت خاک در کل مناطق مورد بررسی

شاخص کیفیت خاک	روش انتخاب ویژگی	کمینه	بیشینه	میانگین	میانه	انحراف معیار
شاخص کیفیت نمورو	MDS	۰/۲۴۰	۰/۵۷۵	۰/۴۲۰	۰/۴۴۶	۰/۱۱۲
	TDS	۰/۲۲۰	۰/۵۷۰	۰/۴۰۰	۰/۴۳۰	۰/۱۱
شاخص کیفیت تجمعی ساده	MDS	۰/۲۸۰	۰/۶۷۸	۰/۴۲۰	۰/۴۴۳	۰/۱۱۳
	TDS	۰/۲۶۹	۰/۵۹۰	۰/۴۲۰	۰/۴۴۰	۰/۱۱
شاخص کیفیت تجمعی وزنی	MDS	۰/۳۱۵	۰/۷۸۰	۰/۴۵۴	۰/۴۴۸	۰/۱۱۴
	TDS	۰/۲۸۵	۰/۶۱۰	۰/۴۲۰	۰/۴۴۰	۰/۱۱

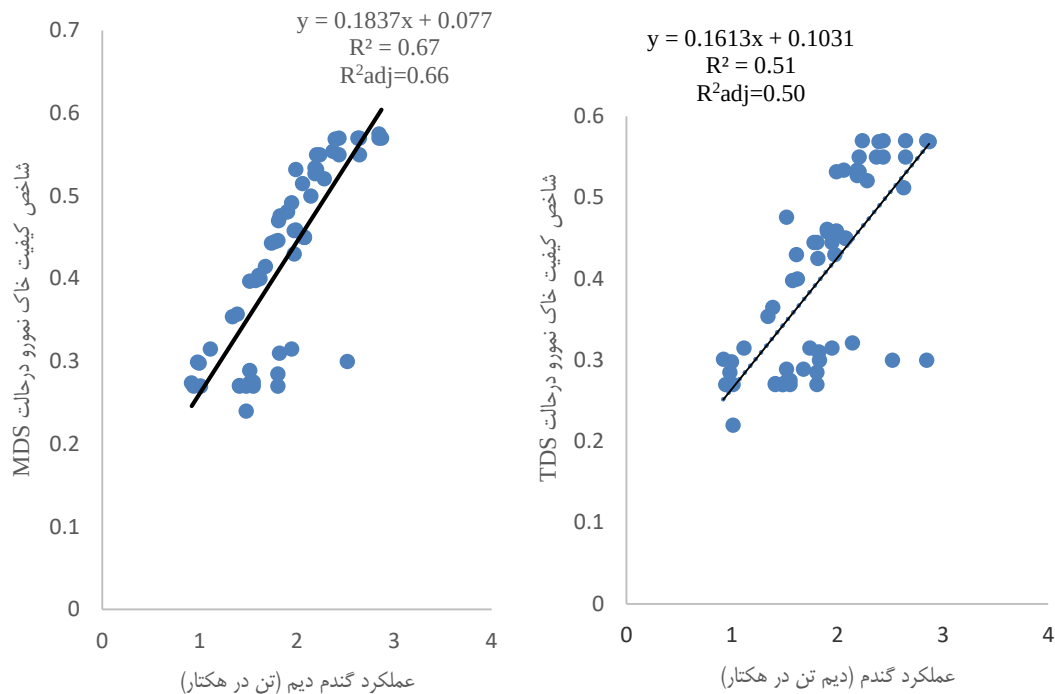
جدول ۶. ماتریس همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم در کشتزارهای دیم در منطقه مورد مطالعه

متغیرها	عملکرد گندم	SQIa-TDS	SQIw-TDS	NQI-TDS	SQIa-MDS	SQIw-MDS	NQI-MDS
عملکرد گندم	۱						
SQIa-TDS	۰/۷۱۶**	۱					
SQIw-TDS	۰/۸۳۷**	۰/۸۶۳**	۱				
NQI-TDS	۰/۸۰۳**	۰/۸۹۱**	۰/۷۵۴**	۱			
SQIa-MDS	۰/۷۹۸**	۰/۹۷۸**	۰/۸۲۹**	۰/۹۰۷**	۱		
SQIw-MDS	۰/۸۷۰**	۰/۸۴۷**	۰/۸۸۹**	۰/۷۱۳**	۰/۸۳۹**	۱	
NQI-MDS	۰/۸۱۹**	۰/۹۷۵**	۰/۸۸۶**	۰/۸۸۲**	۰/۹۶۵**	۰/۸۶۱**	۱

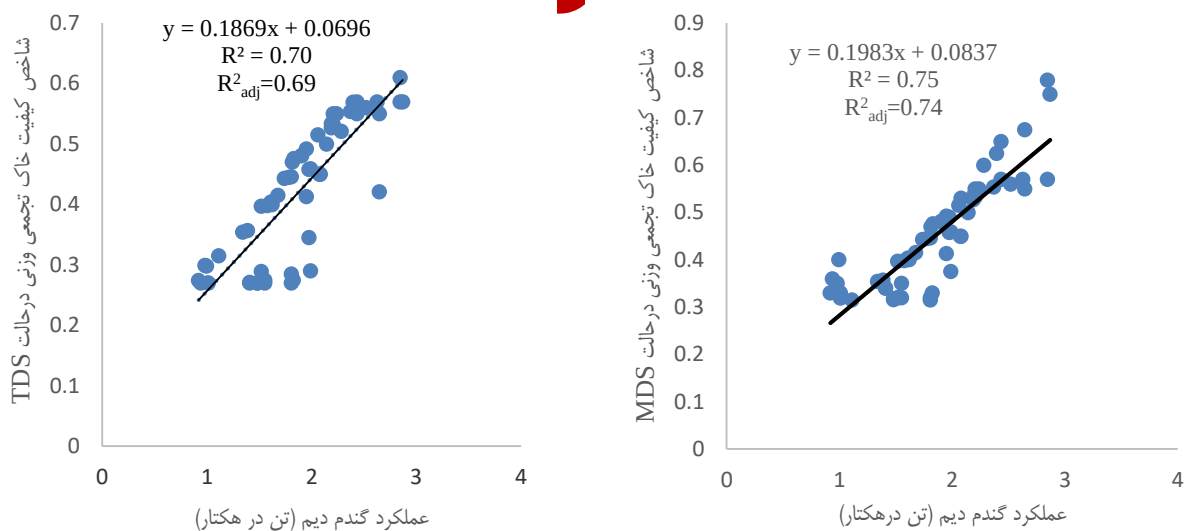
** همبستگی معنی دار در سطح آماری یک درصد

ارزیابی روابط رگرسیونی شاخص‌های کیفیت خاک با عملکرد گندم دیم

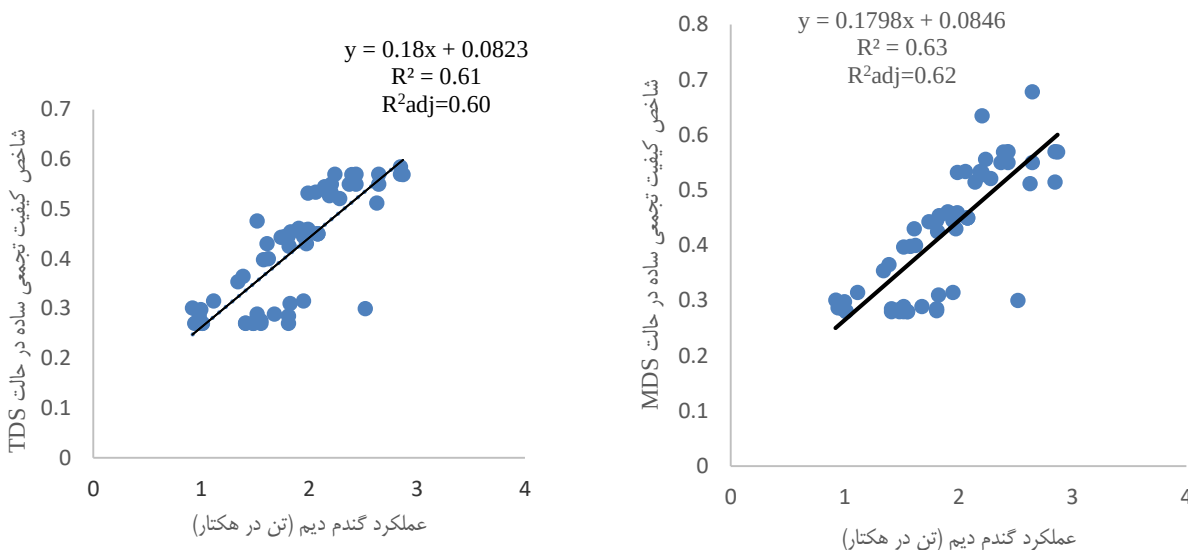
بررسی روابط رگرسیونی خطی بین مدل‌های مختلف شاخص کیفیت خاک و عملکرد دانه گندم دیم (شکل‌های ۳ تا ۵)، پاسخی روشن به فرضیه اصلی این پژوهش مبنی بر اثرگذاری مستقیم مؤلفه‌های کیفیت خاک بر میزان بهره‌وری محصول در اراضی دیم است. همان‌طور که در منحنی‌های رگرسیونی مشخص است، رابطه مثبت و بسیار معنی‌داری ($p < 0.01$) بین عملکرد گندم دیم با تمامی مدل‌های شاخص کیفیت خاک در هر دو رویکرد مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها برقرار است. بر مبنای یافته‌های رگرسیونی، شاخص‌های کیفیت خاک در حالت مجموعه کل داده‌ها بین ۵۱ تا ۷۰ درصد و در حالت مجموعه حداقل داده‌ها بین ۶۳ تا ۷۵ درصد از تغییرات عملکرد دانه گندم دیم را تبیین می‌کنند که این امر بیانگر تأثیر مستقیم وضعیت سلامت و ویژگی‌های ذاتی خاک بر پتانسیل تولید محصول است به منظور بررسی دقیق‌تر و اطمینان از اینکه کاهش تعداد متغیرهای اولیه در فرآیند استخراج شاخص باعث افت کارایی مدل نشده است، ضریب تبیین تعدیل‌شده نیز ارزیابی شد. در رویکرد مجموعه کل داده‌ها، مقادیر ضریب تبیین تعدیل‌شده برای شاخص‌های تجمعی ساده، نمورو و تجمعی وزنی به ترتیب ۰/۶، ۰/۵ و ۰/۶۹ محاسبه شد. در مقابل، با کاهش تعداد متغیرها و حذف روابط هم‌خطی درون‌ساختاری در رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها، مقادیر ضریب تبیین تعدیل‌شده بهبود چشمگیری یافت و به ترتیب به ۰/۶۲، ۰/۶۶ و ۰/۷۴ رسید. بالاتر بودن هم‌زمان ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل‌شده در مدل‌های مبتنی بر مجموعه حداقل داده‌ها در مقایسه با مجموعه کل داده‌ها نشان می‌دهد که تقلیل ویژگی‌های خاک از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی نه تنها توانایی تبیین مدل را کاهش نداده، بلکه با حذف نویزهای آماری و متغیرهای موازی، سبب افزایش دقت و قدرت پیش‌بینی عملکرد گندم دیم شده است. علاوه بر ضرایب رگرسیونی، ارزیابی شاخص حساسیت بر اساس متدولوژی (Masto et al., 2008) نیز برتری رویکرد حداقل داده‌ها را تأیید کرد؛ به طوری که میانگین شاخص حساسیت برای مدل مجموعه حداقل داده‌ها برابر ۲/۴۴ و برای مدل مجموعه کل داده‌ها برابر ۲/۳ به دست آمد. بالاتر بودن شاخص حساسیت در رویکرد مجموعه حداقل ویژگی‌ها نشان‌دهنده توانایی و انعطاف‌پذیری بیشتر این مدل در بازتاب پویای تغییرات خصوصیات خاک تحت تأثیر فرآیندهای تخریب طبیعی و مدیریت زراعی منطقه است. نتایج و روندهای تغییرات رگرسیونی به دست آمده در این بخش، همسو با یافته‌های (Nabiollahi et al., 2020; Rezapour et al., 2021) است. همچنین محققان دیگر در بررسی‌های مشابه، روابط معنی‌داری را بین عملکرد غلات و شاخص‌های کیفیت خاک با ضرایب تبیین در دامنه ۰/۴ تا ۰/۹۸ گزارش کرده‌اند که نشان‌دهنده اعتبار جهانی رویکردهای ریاضی و آماری مورد استفاده در تحقیق حاضر است (Karkaj et al., 2019; Rezaee et al., 2020; Yeilagi et al., 2021).



شکل ۳. ارتباط عملکرد گندم دیم با شاخص کیفیت تجمعی نمورو در مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها



شکل ۴. ارتباط عملکرد گندم دیم با شاخص کیفیت تجمعی وزنی در مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها



شکل ۵. ارتباط عملکرد گندم دیم با شاخص کیفیت تجمعی ساده در مجموعه کل داده‌ها و مجموعه حداقل داده‌ها

بحث و نتیجه گیری

۱. تحلیل مکانیستی مؤلفه‌های اصلی و پویایی فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی آشکار ساخت که مؤلفه اول به تنهایی بیش از ۲۰ درصد از کل واریانس ساختار داده‌ها را پوشش داده و بر دو متغیر درصد شن و ظرفیت تبادل کاتیونی متمرکز است. تلفیق هم‌زمان یک ویژگی فیزیکی (بافت خاک) و یک ویژگی شیمیایی-تبادلی (ظرفیت تبادل کاتیونی) در مؤلفه نخست، بازتاب‌دهنده نقش کلیدی و بنیادین روابط فیزیکی و شیمیایی در پایش سلامت و کارکرد خاک‌های دیم منطقه است. در مدل نهایی این پژوهش، شش متغیر شامل درصد ذرات خاک (شن و سیلت)، ظرفیت تبادل کاتیونی، اسیدیته، کربن آلی و پتاسیم قابل دسترس به عنوان متغیرهای کلیدی و تأثیرگذار بر شاخص کیفیت خاک در قالب مجموعه حداقل داده‌ها استخراج شدند. برهم‌کنش پیچیده این ویژگی‌ها از طریق تنظیم موازنه هیدرولیکی، ظرفیت بافری و پتانسیل تأمین عناصر غذایی در ریزوسفر، نقش مستقیمی در تعیین کلاس نهایی کیفیت خاک اراضی منطقه ایفا می‌کند. مزیت و پویایی آماری رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها در همبستگی بالاتر با عملکرد گندم دیم در مقایسه با مجموعه کل داده‌ها، به دلیل حذف موفقیت‌آمیز نویزهای آماری، خطاهای ناشی از متغیرهای هم‌پوشان و متغیرهای غیرکلیدی است که فاقد ارتباط پدولوژیکی مستقیم با دینامیک رشد گندم دیم بودند. رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها با متمرکز ساختن ماتریس واریانس بر متغیرهای کارکردی، وزن واقعی ویژگی‌های مؤثر را برجسته نموده و سوگیری‌های ناشی از هم‌خطی شدید داده‌ها را از بین برده است.

۲. تحلیل فرآیندهای اقلیمی و ارزیابی کمبود کربن آلی خاک

بررسی‌های پدولوژیکی نشان داد که میانگین مقادیر کربن آلی خاک در مزارع دیم دشت قروه در شرایط بحرانی و بسیار پایین قرار دارد. از دیدگاه مکانیسمی، تشدید تنش‌های خشکی پایان فصل، افت شدید تراز آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم و مدیریت نامناسب اراضی (همچون اعمال سیستم شخم سنتی متوالی، سوزاندن و یا برداشت کامل بقایای گیاهی جهت تغلیف دام)، چرخه کربن را در زیست‌بوم خاک به شدت تحت تأثیر قرار داده است. کمبود شدید ماده آلی مستقیماً پایداری ساختار خاکدانه‌ها را متأثر ساخته، نرخ

متلاشی شدن مکانیکی ذرات خاک را افزایش داده و در نهایت، مزارع دیم منطقه را با چالش جدی کاهش ظرفیت نگهداری آب قابل استفاده مواجه کرده است. تشدید فرآیند خشکی خاک دقیقاً با فازهای حساس فنولوژیکی گندم دیم (به ویژه مراحل گرده افشانی و پر شدن دانه) همزمان می‌شود؛ در این شرایط، افت شدید پتانسیل هیدرولیکی برگ و انسداد روزنه‌ها، فرآیند فتوسنتز جاری و بازدهی انتقال مجدد پرورده‌ها به دانه را مختل کرده و سقف عملکرد دانه را به شدت محدود می‌سازد. اگرچه عدم سنجش نشانگرهای مستقیم بیولوژیکی (نظیر تنفس میکروبی یا پویایی آنزیمی) به عنوان یک محدودیت آزمایشگاهی در این پژوهش مطرح است، اما ابقاء و تثبیت متغیر کربن آلی خاک در مجموعه حداقل داده‌ها توانسته است به عنوان یک متغیر کلیدی، پویایی‌های بیولوژیکی و حاصلخیزی زیست‌بوم خاک ریزوسفری را به خوبی نمایندگی و پوشش دهد؛ چرا که در خاک‌های آهکی مناطق نیمه‌خشک، کربن آلی محرک اصلی جمعیت و فعالیت زیستوده میکروبی خاک محسوب می‌شود.

۳. ارزیابی الگوریتم‌های شاخص کیفیت خاک و دلالت‌های مدیریتی

این پژوهش با هدف توسعه مجموعه حداقل داده‌ها و مقایسه کارایی سه الگوریتم تجمعی وزنی تجمعی ساده و شاخص نمورو در تبیین عملکرد گندم دیم دشت قروه تدوین گردید. دستاوردهای این مطالعه اثبات کرد که تحلیل مؤلفه‌های اصلی با کاهش اثربخش متغیرها به شش ویژگی کلیدی، نه تنها هزینه‌های آزمایشگاهی و زمان پایش کیفی اراضی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد، بلکه به دلیل پالایش خطاها و متغیرهای موازی، توانایی تبیین تغییرات عملکرد را در مدل مجموعه حداقل داده‌ها نسبت به کل مجموعه داده‌ها بهبود می‌بخشد. در میان مدل‌های ریاضی مورد بررسی، شاخص تجمعی وزنی بالاترین کارایی و همبستگی رگرسیونی را با عملکرد واقعی گندم دیم نشان داد؛ زیرا این الگوریتم با دخالت دادن سهم واریانس هر متغیر (استخراج‌شده از تبیین واریانس مؤلفه‌های اصلی)، وزن واقعی و تأثیر فیزیولوژیکی هر ویژگی را در شرایط شکسته و پرتنش کشت دیم به درستی اعمال می‌کند و با واقعیت‌های بیوفیزیکی منطقه انطباق کامل دارد. در مقابل، مدل‌های تجمعی ساده و نمورو به دلیل تخصیص وزن یکسان یا تمرکز بیش از حد بر کمترین امتیاز، پویایی کمتری در برآورد پتانسیل تولیدی نشان دادند.

نتیجه گیری کلی

پژوهش حاضر نشان داد که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از رویکرد مجموعه حداقل داده‌ها یک ابزار کارآمد، دقیق و اقتصادی برای پایش پایداری اراضی گندم دیم دشت قروه است. بر اساس نتایج، شش ویژگی شامل درصد شش، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد سیلت، اسیدیته، کربن آلی و پتاسیم قابل دسترس به عنوان حساس‌ترین نشانگرهای سلامت خاک منطقه انتخاب شدند. مقایسه الگوریتم‌های مختلف مشخص ساخت که شاخص تجمعی وزنی در حالت حداقل داده‌ها به دلیل همبستگی آماری بالاتر با عملکرد واقعی گندم دیم و انعکاس دقیق‌تر فرآیندهای خاک، برترین مدل برای ارزیابی‌های پدولوژیکی در این منطقه است. در نهایت، کلاس‌بندی مقادیر عددی شاخص‌ها نشان داد که بخش عمده‌ای از اراضی تحت کشت گندم دیم دشت قروه در کلاس کیفی ضعیف (IV) قرار می‌گیرند. توزیع گسترده این کلاس کیفی نازل، هشدار پدولوژیکی بسیار مهمی برای پایداری امنیت غذایی و تولید گندم در این قطب دیم‌کاری کشور است. این وضعیت نامطلوب عمدتاً ناشی از زوال ساختار فیزیکی و تخلیه شدید کربن آلی خاک تحت مدیریت‌های زراعی نامناسب، فرساینده و سنتی است؛ امر مهمی که ضرورت بازنگری بنیادین در سیستم‌های مدیریت اراضی، اعمال خاک‌ورزی حفاظتی و احیای بیولوژیکی پتانسیل تولید خاک را به عنوان یک راهبرد اجتناب‌ناپذیر آشکار می‌سازد.

پیشنهاده‌ها

با توجه به اینکه افت کیفیت خاک دشت قروه و سقوط آن به کلاس کیفی ضعیف (IV)، مستقیماً ناشی از چالش‌های فیزیکی و شیمیایی، کاهش حاصلخیزی و اعمال مدیریت نامناسب اراضی است، راهکارهای عملیاتی و راهبردی زیر جهت احیای سلامت خاک، بهبود بهره‌وری هیدرولیکی و پایداری عملکرد گندم در منطقه پیشنهاد می‌شود:

- پیاده‌سازی نظام کشاورزی حفاظتی و مدیریت بقایای گیاهی ترویج فرهنگ عدم سوزاندن بقایای زراعی و مکلف ساختن مزارع به حفظ حداقل ۳۰ درصد از بقایای گندم در سطح اراضی، این اقدام از طریق کاهش نرخ تبخیر سطحی، تعدیل دمای خاک و تغذیه تدریجی زیتوده میکروبی خاک، منجر به ارتقای کربن آلی و بهبود پایداری ساختار خاکدانه‌ها در مواجهه با تنش خشکی آخر فصل می‌شود.
- اصلاح الگوی خاک‌ورزی و توسعه کشت مستقیم: حذف تدریجی گاواهن‌های برگردان‌دار سنتی و جایگزینی آن‌ها با ادوات کم‌خاک‌ورزی و کارنده‌های کشت مستقیم، این تغییر ساختاری با کاهش دست‌کاری مکانیکی افق سطحی خاک، از متلاشی شدن فیزیکی خاکدانه‌ها، وقوع فرسایش شدید بادی و کاهش کربن ساختاری در دشت قروه جلوگیری می‌کند.
- بهبود تناوب زراعی پایدار در اراضی دیم: بازنگری در سیستم سنتی آیش-گندم و وارد کردن لگوم‌های دیم متناسب با اقلیم سرد منطقه (مانند نخود و ماشک) یا نباتات علوفه‌ای مقاوم به خشکی در چرخه تناوب. این راهبرد بیولوژیکی علاوه بر قطع چرخه آفات و بیماری‌ها، از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و تنوع‌بخشی به بقایای ریشه‌ای، حاصلخیزی ذاتی خاک را بهبود می‌بخشد.
- توسعه نقشه‌برداری رقومی و پهنه‌بندی مکانی کیفیت خاک: با توجه به اهمیت ملموس بودن داده‌های پدولوژیکی برای سیاست‌گذاران و مدیران اجرایی بخش کشاورزی، پیشنهاد می‌شود در فازهای بعدی پژوهش، نقشه‌های پهنه‌بندی و تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از متدهای زمین‌آمار سنجش از دور و مدل‌های رقومی^۷ تهیه شود. این نقشه‌های کاربردی به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهند تا با شناسایی دقیق لکه‌های بحرانی دشت قروه، تصمیمات متناسب با پتانسیل واقعی هر پهنه اتخاذ نمایند.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- آمارنامه سازمان هواشناسی، (۱۴۰۲). آمارنامه اداره کل هواشناسی استان کردستان.
- بی دست، سولماز، و گلچین، احمد (۱۴۰۴). ارزیابی ارتباط بین شاخص کیفیت خاک و تغییرات کربن آلی تحت تأثیر کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: منطقه سه‌پند استان آذربایجان شرقی). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۴(۱): ۲۷۵-۲۹۸.
- سلمان‌پور، آناهید (۱۴۰۳). اثر تعیین حد آستانه بر شاخص‌های کیفیت خاک در برخی باغات و شالیزارهای مرووک، استان لرستان. پژوهش‌های خاک، ۳۸(۳): ۲۷۰-۲۵۱.

کریمی، علیرضا، مقامی مقیم، فرشته و قاسم زاده گنجی، محمد (۱۴۰۱). ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ در باغ‌های پسته بجنستان، شمال شرق ایران. علوم و فناوری پسته، ۷(۱۲)، ۲۱-۱.

متین‌فر، حمید رضا، جلالی، محبوبه، و محمدی، سیما. (۱۳۹۸). کیفیت خاک، انتشارات جهاد دانشگاهی، تهران.

میرخانی، رسول، بایبوردی، احمد، سعادت، سعید، اسمعیل نژاد، لیلا و رضایی، حامد. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت خاک اراضی تحت کشت گندم آبی در دشت تبریز. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۴(۱۲)، ۱۹۹۴-۱۹۸۱.

وزارت جهاد کشاورزی، (۱۴۰۲). آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، جلد اول، محصولات زراعی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی.

Andrews S. S., Karlen D. L., and Cambardella C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.

Andrews S. S., Karlen D. L., and Mitchell J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture ecosystems and environment*, 90(1), 25-45.

Armenise E., Redmile-Gordon M. A., Stellacci A. M., Ciccarese A., and Rubino P. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130(2), 91-98.

Askari, M. S., & Holden, N. M. (2015). Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*, 150, 57-67.

Bhaduri D., Sihi D., Munda S., Verma B., Bhowmik A., and Dahi B. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 60(4), 1-25.

Bidast, Solmaz, and Golchin, Ahmad (1404). Evaluation of the Relationship Between Soil Quality Index and Organic Carbon Variations Under Different Land Uses (Case Study: Sahand Region, East Azerbaijan Province). *Geography and Environmental Hazards*, 14(1), 275-298. (In persian).

Biswas, S., Hazra, G. C., Purakayastha, T. J., Saha, N., Mitran, T., Roy, S. S. Basak, N., & Mandal, B. (2017). Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma*, 292(1), 34-48.

Blake GR., and Hartage KH, (1986). Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Ed. *Agronomy Monograph*, 9(2), 363-382.

Brejda JJ., Moorman TB., Karlan DL. And Dao TH. (2000). Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains, *Soil Science Society of America*, 64(6), 2115-2124.

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T. W., Mäder, P., Puleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.

Dengiz, O., Sekan, I. C., Saygin, F. and Imamoglu, A. (2020). Assessment of Soil Quality Index for Tea Cultivated Soils in Ortaçay Micro Catchment in Black Sea Region. *Journal of Agricultural Sciences*, 26(1), 42-53.

Dexter A. R. (2004). Soil Physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214.

Dobermann A., and Oberthur T. (1997). Fuzzy mapping of soil fertility—a case study on irrigated riceland in the Philippines. *Geoderma*, 77(2-4), 317-339.

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics*, 69(9), 1858-1868.

Doran J. W. and Parkin T.B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Soil Science Society of America*, 49(1), 25-37.

Gee, G. W. and Or, D. (2002). Particle-size analysis *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series, 5, 255–289.

Govaerts B., Sayre K. D., and Deckers J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and tillage research*, 87(2), 163-174.

Hamidi Nehrani, S., 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.

Hume, L., and Shirriff, S. (1995). The effect of quadrat shape and placement on the accuracy of yield and density estimates for crops seeded in narrow rows. *Canadian Journal of Plant Science*, 75(4), 889-892

Isong, I. A., John, K., Okon, P. B., Ogban, P. I and ,Afu, S. M. (2022). Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria .*Ecological Processes*, 11(1), 1-22.

Karimi, Alireza, Maghami Moghim, Fereshteh, and Ghasemzadeh Ganji, Mohammad (2022). Evaluation of Topsoil and Soil Profile Quality Indicators in Pistachio Orchards of Bajestan, Northeast Iran. *Pistachio Science and Technology*, 7(12), 1–21. (In persian).

Karkaj, E. S., Sepehry, A., Barani, H., Motamedi, J. T. and Shahbazi, F. (2019). Establishing a suitable soil quality index for semi-arid rangeland ecosystems in northwest of Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 648-658.

Karlen D. L., Tomer M. D., Neppel J., and Cambardella C. A. (2008). A preliminary watershed scale soil quality assessment in north central Iowa, USA. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 291-299.

Lal, R. (1994). Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Department of Agronomy The Ohio State University Columbus, Ohio. Soil Management Support Services USDA Soil Conservation Service, and U.S. Agency for International Development, 1, 2-70.

Li, P., Shi, K., Wang, Y., Kong, D., Liu, T., Jiao, J., ... and Hu, F. (2019). Soil quality assessment of wheat maize cropping system with different productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, 190, 31-40.

Liu, Sh., Wang, m., Wang, R., Jiang, G., Li, Y., Liu, Ch., Shen, F., Liu, F., Jie, Xi., and Yang, J. (2025) Soil organic carbon and ecosystem multifunctionality are enhanced by subsoiling in fluvo-aquic soil of North China Plain. *Frontiers in Plant Science*, 16, 40-65.

Liu, Z., Zhou, W., Li, S., He, P., Liang, G., Lv, J., & Jin, H. (2015). Assessing soil quality of gleyed paddy soils with different productivities in subtropical China. *Catena*. 133:293–302.

Masto R. E., Chhonkar P. K., Singh D., and Patra A. K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental monitoring and assessment*, 136(1), 419-435.

Meteorological Organization Statistical Yearbook, (2023–2024). Statistical Yearbook of the General Directorate of Meteorology of Kurdistan Province. (In persian).

Ministry of Agriculture Jihad (2023). Agricultural Statistics Yearbook for the 2021–2022 Crop Year, Volume I: Field Crops, Information and Communication Technology Center, Deputy for Planning and Economic Affairs. (In persian).

Mirkhani, Rasoul, Baybordi, Ahmad, Saadat, Saeed, Esmaeilnejad, Leila, and Rezaei, Hamed. (2023). Soil Quality Assessment of Irrigated Wheat Cultivation Lands in the Tabriz Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(12), 1981–1994. (In persian).

Nabiollahi K., Heshmat E., Mosavi A., Kerry R., Zeraatpisheh M., and Taghizadeh-Mehrjardi R. (2020). Assessing the influence of soil quality on rainfed wheat yield. *Agriculture*, 10(10), 469.

Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (2018). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16–28 .

Nakajima, T., Lal, R., & Jiang, S. (2015). Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 146, 323-328.

Nannipieri, P., Greco, S., & Ceccanti, B. (1990). Ecological significance of the biological activity in soil. In: Bollag, J. M., Stozky, G. (Eds.), *Soil Biochemistry*. 6, New York, 293-355.

National Research Council. (1993). *Soil and water quality: An agenda for agriculture*. National Academies Press.

Olsen S.R., and Sommers L. (1982). phosphorus. In: A.L. Page: *Methods of Soil Analysis*, Agron. No. 9 Part 2: Chemical and Microbiological Properties, (Ed.) Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA, 401- 430.

Page A.L. Miller R.H., and Keeney D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, part 2, Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, WI.

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(3), 325-334.

Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z. and Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40, 19-26.

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.

Rezaee L., Moosavi A. A., Davatgar N., and Sepaskhah A. R. (2020). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators*, 117, 106566.

Rezapour S., Nouri A., Jalil H. M., Hawkins S. A., and Lukas S. B. (2021). Influence of treated wastewater irrigation on soil nutritional-chemical attributes using soil quality Index. *Sustainability*, 13(4), 1952.

Salmanpour, Anahid (1403). The Effect of Establishing Threshold Limits on Soil Quality Indicators in Certain Orchards and Rice Paddies of Marvuk, Lorestan Province. *Soil Research*, 38(3), 251–270. (In persian).

Shukla M. K., Lal R., and Ebinger M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204.

Sione, S.M.J., M.G. Wilson, M. Lado, and A.P. González. (2017). Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a Vertisol, using a soil quality index. *Catena* 150, 79-86.

Sparks D.L., Helmke P.A., and Page A.L. (1996). *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods* (No. 631.417/S736 V.3). Part 3. SSSA, ASA, Madison WI.

Tian, K., Zhang, B., Zhang, H., Huang, B., Darilek, J.L., Zhao, Y. & Yang, J. (2020). Evaluation of soil quality in major grain-producing region of the North China Plain: integrating minimum data set and established critical limits. *Ecological Indicators*. 117, 106613.

Toledo, D. M., Galantini, J., Dalurzo, H., Vazquez, S. and Bollero, G. (2013). Methods for assessing the effects of land use changes on carbon stocks of subtropical oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 77(5), 1542-1552.

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 .

Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.

Wang, L., Guo, J., Liu, X., Li, K., Ma, L., Tian, Y., Wang, J., Zhang, Q., Tian, Y., Li, C., & Lu, M. (2023). Assessment of soil quality in an arid and barren mountainous of Shandong province, China. *Scientific Reports*, 13(1), 19966.

Determining the minimum data set for soil quality assessment of rainfed wheat lands in Qorveh Plain, Iran.

Abstract

Soil quality is fundamental to agricultural sustainability, optimal land management, and productivity. This study determined a minimum data set (MDS) for evaluating soil quality and compared three indices additive (SQIa), weighted (SQIw), and Nemoro (NQI) in dryland wheat areas of the Qorveh Plain. Soil samples (0–30 cm depth) were collected to measure physical, chemical, and fertility attributes. Using principal component analysis (PCA), six properties (sand %, silt %, cation exchange capacity, pH, organic carbon, and available potassium) were selected for the MDS. Indices were calculated using both the total data set (TDS) and MDS, and regressed against crop yield. Results revealed a significant correlation ($p < 0.01$) between wheat yield and all soil quality indices. Under the MDS framework, the highest coefficient of determination was achieved by SQIw ($R^2 = 0.75$), followed by NQI ($R^2 = 0.67$) and SQIa ($R^2 = 0.63$). A matching pattern emerged for the TDS baseline, though with lower predictive values ($R^2 = 0.70, 0.61, \text{ and } 0.51$, respectively). Consequently, the weighted additive index (SQIw) demonstrated a superior capacity to explain yield variations. Due to higher yield correlations, lower analytical costs, and a reduced indicator count, the MDS approach proved more efficient than using the full TDS. Ultimately, the overall soil quality of the agricultural land in the study region was classified as poor (Class IV).

Keywords: Soil quality index, Principal component analysis, Minimum data set, Sustainable soil management

Extended Abstract

Introduction

Agricultural sustainability in arid and semi-arid environments faces severe challenges due to topsoil degradation, erratic climatic parameters, and suboptimal land management schemes. In country regions like Iran, dryland wheat functions as a critical backbone for domestic food security and rural livelihoods. However, rainfed production systems are exceptionally vulnerable to changing soil physiochemical matrix conditions, which dictate water retention capacity, nutrient availability, and plant structural support. Evaluating soil quality is widely accepted as an effective operational pathway to monitor the environmental footprints of continuous tillage and to optimize landscape-scale productivity. Because soil is an expansive multi-component system, tracking every physical, chemical, and biological attribute continuously is financially prohibitive and labor-intensive. This logistical obstacle has led to the scientific formulation of two parallel methodologies: the Total Data Set (TDS) and the Minimum Data Set (MDS). The MDS framework integrates advanced multivariate statistics—most notably Principal Component Analysis (PCA)—to distill a high-dimensional dataset into a sparse, high-fidelity cluster of sensitive soil indicators. While multiple quantitative frameworks exist to aggregate these indicators into cohesive numeric values, three schemes dominate contemporary soil health research: The Additive Soil Quality Index (SQIa): Integrates normalized scores uniformly under an equal-weight assumption. The Weighted Soil Quality Index (SQIw): Allocates distinct mathematical weights scaled to the total variance explained during PCA extraction. The Nemoro Quality Index (NQI): Calculates composite metrics by intentionally pairing average scores with the absolute minimum score observed to capture extreme limiting factors. To date, comparative validations of these competing indices across specialized regional geomorphologies in Western Iran remain sparse. The Qorveh Plain, situated within the Kurdistan Province, represents a crucial dryland agricultural zone characterized by aggressive seasonal microclimates and vulnerability to organic matter depletion. This investigation was structured to fill these knowledge gaps by: Establishing a highly localized MDS for rainfed wheat agroecosystems. Empirically validating and comparing SQIa, SQIw, and NQI algorithms across both TDS and MDS baselines. Dissecting their empirical relationships with field-measured crop yields to provide regional producers with an optimal land diagnostic framework.

Method

study Area and Environmental Baseline The investigative footprint spans the agricultural coordinates of the Qorveh Plain, located in Kurdistan Province, Western Iran. This zone features a predominantly cold semi-arid climate regime. The landscape is dominated by extensive open plains historically dedicated to rainfed winter wheat cultivation under conventional mechanical moldboard plowing regimes. Soil Sampling and Laboratory Fingerprinting Field campaigns were executed immediately post-harvest. A total of representative georeferenced points were designated across actively managed dryland fields. Soil cores were systematically extracted from the primary root zone zone from a depth of zero to thirty centimeters, where active nutrient exchange and root development manifest. Samples were air-dried, crushed, and passed through a two millimeter physical mesh sieve to isolate fine earth fractions. Laboratory procedures quantified a comprehensive suite of physical, chemical, and fertility characteristics: Physical Attributes: Particle size distribution, specifically sand and silt percentages, was extracted using the hydrometer standard procedure. Chemical Attributes: Soil reaction (pH) was determined pH meter. Electrical conductivity was logged via saturated paste extracts. Cation Exchange Capacity was estimated via the sodium acetate exchange extraction method. Fertility Indicators: Soil Organic Carbon was mapped utilizing the Walkley-Black wet oxidation sequence. Available Potassium was measured through ammonium acetate extraction coupled with flame photometry detection. Available Phosphorus was evaluated through the Olsen sodium bicarbonate method. Minimum Data Set Generation To construct the MDS, the comprehensive indicator repository (TDS) was subjected to Principal Component Analysis to isolate components displaying Eigenvalues greater than one. Within each selected Principal Component, individual variables exhibiting factor loadings within ten percent of the maximum absolute loading value were consolidated into a high-priority sub-group. When multiple overlapping indicators emerged within a single component window, statistical redundancies were resolved using Pearson correlation metrics. If highly correlated pairs occurred, the parameter displaying the highest cumulative factor loading was retained in the final MDS, while the redundant parameters were excluded. Mathematical Formulation of Soil Quality Indices Indicator scoring was processed using standard non-linear scoring functions, normalizing parameters into a standardized scale ranging from zero to one. Variables were categorized into three functional models: "higher is better" for organic carbon, CEC, and available nutrients; "lower is better" for compaction or salinity indicators; and "optimum range" for soil pH. The standardized scores were aggregated via three distinct indexing equations representing the additive soil quality index, the weighted soil quality index, and the Nemoro quality index. The additive framework averaged the normalized indicator scores uniformly. The weighted approach scaled each score according to the statistical weight derived from the variance explained during PCA.

Results and Discussion

PCA Trajectories and MDS Composition Statistical extraction via PCA confirmed that a substantial portion of total soil dataset variance could be effectively mapped to major principal components. Through systematic screening, six distinct attributes were selected for inclusion in the final MDS: Sand Percentage Silt Percentage Cation Exchange Capacity (CEC) Soil pH Soil Organic Carbon (SOC) Available Potassium The retention of both sand and silt highlights the vital role that physical soil texture plays in controlling structural stability and conserving limited soil moisture in rainfed systems. The chemical parameters, pH and CEC, reflect the structural dynamics of nutrient adsorption and availability in these calcareous soils. Soil organic carbon emerged as the single most critical driver across the datasets, acting as a master variable that directly influences structural stability, water holding capacity, and microbial nutrient cycling. Quantitative Evaluation of Index Performance To rigorously assess the predictive capacity of each soil index configuration, computed metrics were regressed against actual, field-verified dryland wheat yields. The linear regression analytics demonstrated a statistically significant correlation at the five percent probability level across all evaluated mathematical permutations, confirming a strong functional link between quantitative soil properties and overall crop productivity. The comparative regression analysis revealed that the Weighted Additive Soil Quality Index combined with the MDS structure achieved the highest explanatory power with a coefficient of determination of 0.75. This configuration outperformed both the Nemoro index, which scored 0.67, and the Simple Additive index, which scored 0.63. Interestingly, a matching performance hierarchy was observed across the TDS computations, though it yielded consistently lower coefficients of determination. Specifically, the weighted index achieved 0.70, followed by the Nemoro index at 0.61, and the simple additive framework at 0.51. The superior performance of the MDS over the TDS can be attributed to the elimination of statistical noise and redundant multicollinear variables, which often obscure key soil processes when utilizing unweighted full-scale datasets. Regional Soil Quality Zonation Using the calculated weighted additive index values, the soils of the Qorveh Plain were categorized into standardized environmental health classes. The vast majority of the rainfed wheat acreage fell squarely into Class IV, representing Poor Quality. This widespread classification indicates severe soil degradation across the region. Decades of continuous conventional tillage, complete crop residue removal, and insufficient organic matter inputs have depleted the soil organic carbon pools. This depletion has disrupted soil aggregate stability, accelerated structural compaction, and limited nutrient availability, leaving the soil poorly equipped to support optimal dryland crop production.

Conclusions

This study evaluated soil quality indices for dryland wheat cultivation in the Qorveh Plain. The statistical distillation of the total dataset via Principal Component Analysis successfully established a streamlined Minimum Data Set composed of six key indicators: sand percentage, silt percentage, CEC, soil pH, SOC, and available potassium. The Weighted Additive Soil Quality Index paired with the MDS approach proved to be the most accurate and efficient model for predicting rainfed wheat yields. Because it minimizes data redundancies, reduces laboratory analytical costs, and provides superior predictive capacity compared to the TDS, this MDS-based framework offers a highly practical tool for regional agricultural monitoring. The widespread classification of the study area as Class IV (Poor Quality) highlights an urgent need to transition from intensive conventional

farming toward conservation agriculture. Implementing strategies such as reduced or no-tillage, retaining crop residues, and integrating organic soil amendments will be essential to rebuild organic carbon reserves, restore soil health, and ensure long-term food security in the region.

پیراستنای نشده