

تغییرات مکانی وضعیت حاصلخیزی خاک شالیزارهای بخش جنوبی دشت فومنات

ناصر دوات‌گر¹، مریم شکوری‌کتیگری، لیلا رضائی، بهاره دل‌سوز خاکی، حسن شکری واحد و

مسعود کاووسی

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

دانشجوی دکتری، علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ maryamshakouri@ymail.com

دانشجوی دکتری، علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ l.rezaee77@gmail.com

محقق، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ b_delsooz@yahoo.com

مربی پژوهش، عضو هیأت علمی موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران؛ shokri_v@yahoo.com

دانشیار، عضو هیأت علمی موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران؛

masoud_kavoosi2@yahoo.com

دریافت: 97/4/19 و پذیرش: 98/4/12

چکیده

ارزیابی جامع کیفیت خاک‌های کشاورزی برای تصمیم‌گیری‌های خردمندان که سبب تولید پایدار و حفظ محیط زیست می‌شود، ضروری است. بسیاری از مطالعات نشان دادند که شاخص کیفیت خاک که بر اساس ترکیبی از ویژگی‌های خاک است در مقایسه با ویژگی‌های فردی خاک بهتر می‌تواند شرایط خاک را توصیف نماید. در این تحقیق برای ارزیابی کیفیت خاک اراضی شالیزاری نیمه جنوبی دشت فومنات ابتدا با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یک مجموعه داده‌های حداقل تهیه و سپس ویژگی‌های کمی خاک از طریق نمره‌دهی کیفی شد. در نهایت با وزن‌دهی به هر ویژگی (از طریق روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی)، شاخص کیفیت خاک (SQI) بدست آمد و در نرم‌افزار GIS به پهنه تبدیل شد. نتایج نشان داد، بیشتر خاک‌ها (97 درصد نمونه خاک‌ها) هدایت الکتریکی کمتر از 2 دسی‌زیمنس بر متر در گروه خاک‌های طبیعی و بدون محدودیت قرار داشتند. بیشتر خاک‌های اراضی شالیزاری مورد مطالعه دارای pH مناسب و بدون محدودیت خاص بود. میانگین حسابی غلظت فسفر قابل‌استفاده به علت وجود تعدادی نمونه با غلظت زیاد از حد بحرانی آن (12 میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتر بود، اما در بیش از 50 درصد منطقه وضعیت نامطلوب فسفر وجود داشت. نزدیک به 76 درصد مناطق مورد بررسی دارای نیتروژن کل بالاتر از 0/2 درصد بودند که نشان‌دهنده کفایت نسبی این عنصر غذایی در بیشتر اراضی است. غلظت پتاسیم قابل استفاده در بیشتر مناطق مورد بررسی کمتر از حد بحرانی بود. بازنمایی شاخص کیفیت خاک نشان داد که بخش محدودی از اراضی شالیزاری که دارای کیفیت حاصلخیزی بدی بودند عمدتاً متأثر از محدودیت عوامل ذاتی و ایستای خاک مانند رس، کربن آلی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک بودند، اما بیشتر اراضی مورد مطالعه دارای کیفیت حاصلخیزی متوسط بوده و مهمترین عامل محدود کننده آن کمبود عناصر غذایی فسفر و پتاسیم قابل استفاده است. این در حالیست که مصرف کودهای فسفر و پتاسیم در این ناحیه کم است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی با جی آی اس، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت خاک، استان گیلان.

¹ نویسنده مسئول، آدرس: موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

مقدمه

کیفیت خاک اراضی شالیزاری در استان‌های شمالی کشور (گیلان، مازندران و گلستان) از نظر نقش آن در تولید برنج دارای اهمیت زیادی است. شناخت بهتر کیفیت خاک، آگاهی از روند سلامت خاک و تشخیص وسعت و شدت تخریب خاک در مدیریت پایدار استفاده از اراضی مهم است (بیندرابان و همکاران، 2000). این آگاهی فقط از طریق ارزیابی صحیح و مطلوب کیفیت خاک بدست می‌آید کاهش کیفیت خاک چالش بزرگی برای افزایش بهره‌وری کشاورزی، رشد اقتصادی و حفظ محیط زیست است.

کیفیت خاک با توانایی خاک برای ارائه شرایط بهینه برای رشد گیاه با حفظ بهره‌وری محصول تعریف می‌شود (وب و همکاران، 2000). کیفیت خاک تابع مولفه‌ها و فرایندهای پیچیده است که نمی‌توان به طور مستقیم در مزرعه یا آزمایشگاه اندازه‌گیری نمود؛ اما می‌توان آن را با روابط ریاضی یا روش‌های آماری مختلف تعیین نمود (استوکینگ، 2003). کیفیت خاک دارای اهداف مدیریتی و شیوه‌ای برای استفاده بهتر از ویژگی‌های خاک است. اهداف تعیین کیفیت خاک به سه گروه: بهبود کیفیت محیط زیست، پایداری تولید و احیای وضعیت اجتماعی و اقتصادی بهره‌برداران تقسیم می‌شود (آندرو و همکاران، 2002a). کیفیت خاک به عنوان عاملی که ویژگی‌های ذاتی و مدیریتی خاک بر آن مؤثر است در نظر گرفته می‌شود (دوران و پارکین، 1994). بیشتر روش‌های ارزیابی کیفیت خاک پس از انتشار سیستم طبقه‌بندی قابلیت اراضی در سال 1961 به وسیله سرویس حفاظت خاک آمریکا (کلینگیل و مونت‌گومری، 1961) توسعه پیدا کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به بسته لوازم (کیت) تعیین کیفیت خاک (دیتزلر و توگل، 2002) و تدوین شاخص کیفیت خاک (SQI) (دوران و پارکین، 1994) اشاره نمود. در بین این روش‌ها، امروزه استفاده از شاخص کیفیت خاک متداول‌ترین روش بوده (آندروز و همکاران، 2002 a) که برتری آن در قابلیت استفاده آسان، انعطاف‌پذیری و کمی بودن است (آرخازلو و همکاران، 1390). در این رابطه بسیاری از مطالعات نشان دادند که شاخص کیفیت خاک که بر پایه تلفیقی از ویژگی‌های خاک است در مقایسه با ویژگی‌های فردی خاک بهتر می‌تواند شرایط خاک را توصیف نماید (آندروز و همکاران، 2002a؛ آندروز و همکاران، 2002 b؛ ماستو و همکاران، 2007).

شاخص‌های کیفیت خاک ترکیبی از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی خاک می‌باشند (آپارسو و کوستا، 2007). این شاخص‌ها ابزارهای تصمیم‌گیری هستند که به گونه‌ای مؤثر مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاک را برای تصمیم‌سازی چند هدفه تلفیق می‌نمایند. در این شاخص‌ها، شیوه‌های تعریف شده‌ای برای گزینش، نمره‌دهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک وجود دارند که به صورت مدل‌های جامعی امکان تعیین و مقایسه کیفیت خاک‌های مناطق مختلف را به صورت علمی فراهم می‌کند (یانگ بین و همکاران، 2009؛ شهاب آرخازلو و همکاران، 1390). تعیین سیستم شاخص کیفیت خاک (SQI) در سه مرحله انجام می‌شود (آندروز و کارول، 2001): 1) انتخاب روش-هایی برای تهیه یک مجموعه مشخص از داده‌ها، 2) تبدیل ویژگی‌های کمی خاک به متغیرهای کیفی و 3) تلفیق متغیرهای کیفی در یک شاخص کیفیت خاک.

در ارزیابی کیفیت خاک از دو روش مجموعه داده‌های کل^۲ (TDS) و مجموعه داده‌های حداقل^۳ (MDS) برای تهیه یک مجموعه مشخص از داده‌ها استفاده می‌شود. برخی از پژوهشگران شاخص کیفیت خاک را براساس مجموعه داده‌های کل (TDS) تعیین کردند (دوران و پارکین، 1994)؛ اما برخی دیگر انتخاب تعداد محدودتری از ویژگی‌هایی خاک که نماینده بهتری از کیفیت خاک بودند، را به عنوان مجموعه داده‌های حداقل (MDS)، راهکار بهتری برای تعیین کیفیت خاک پیشنهاد کردند. مفهوم استفاده از مجموعه داده‌های حداقل در تعیین کیفیت خاک که منعکس‌کننده اهداف مدیریتی پایدار باشد در سطح وسیعی مورد قبول واقع شده است، و عمدتاً بر پایه نظر کارشناسان^۴ و یا روش‌های آماری چندمتغیره مانند تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی قرار دارد (آندروز و همکاران، 2002 a؛ آندروز و همکاران، 2002 b). از دیدگاه برخی محققین استفاده از MDS در انتخاب ویژگی‌های مؤثر در کیفیت خاک از نظر هزینه و زمان کارآمدتر است (گووارتر و همکاران، 2006؛ کای و همکاران، 2009).

برای کاهش تعداد داده‌ها از میان کل ویژگی‌های مورد بررسی خاک با استفاده از PCA ویژگی‌هایی را که بیشترین تاثیر را بر کیفیت خاک منطقه دارند، انتخاب می‌شود. انتخاب ویژگی‌هایی از خاک که به بهترین شکل نشان دهنده وضعیت کیفیت خاک است، اهمیتی کلیدی در

² Total data set

³ Minimum data set

⁴ Expert opinions

¹ Soil Quality Index

نواحی مدیریتی استفاده کردند. اراضی شالیزاری دشت فومنات واقع در استان گیلان با توجه به سیستم‌های مجهز آبیاری و زهکشی و کانون توسعه عملیات تسطیح و یکپارچه‌سازی از نواحی مهم در تولید گیاه برنج در شمال کشور است. این دشت، اراضی شالیزاری شهرستان‌های صومعه‌سرا، فومن، شفت و کرانه غربی شهرستان رشت را شامل می‌شود. انتظار بر این است که بهبود کیفیت حاصلخیزی خاک با تأثیر بر بهبود مدیریت مصرف کود (مقدار و زمان مصرف کود) نقش مهمی در تولید پایدار اقتصاد برنج ناحیه داشته باشد. دوات‌گر و همکاران (2012) کیفیت حاصلخیزی اراضی شالیزاری صومعه‌سرا را تعیین کردند، اما کیفیت حاصلخیزی دیگر اراضی این دشت تعیین نشده است. این تحقیق با هدف تعیین وضعیت و کیفیت حاصلخیزی اراضی شالیزاری جنوب دشت فومنات و بازنمایی آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در اراضی شالیزاری به وسعت 23000 هکتار از شهرستان‌های فومن و شفت واقع در جنوب دشت فومنات انجام شد. موقعیت جغرافیایی دشت فومنات به همراه نقاط نمونه برداری خاک در شکل 1 نشان داده شده است. پس از حذف نواحی جنگلی، باغ‌ها و محدوده خانه‌های روستایی، 183 نمونه از افق سطحی گلخراپ خاک اراضی شالیزاری با توزیع ناحیه‌ای یکنواخت و ثبت موقعیت جغرافیایی تهیه و پس از خشک شدن در هوای آزاد از الک 2 میلی‌متر عبور داده و برای اندازه‌گیری آماده شدند.

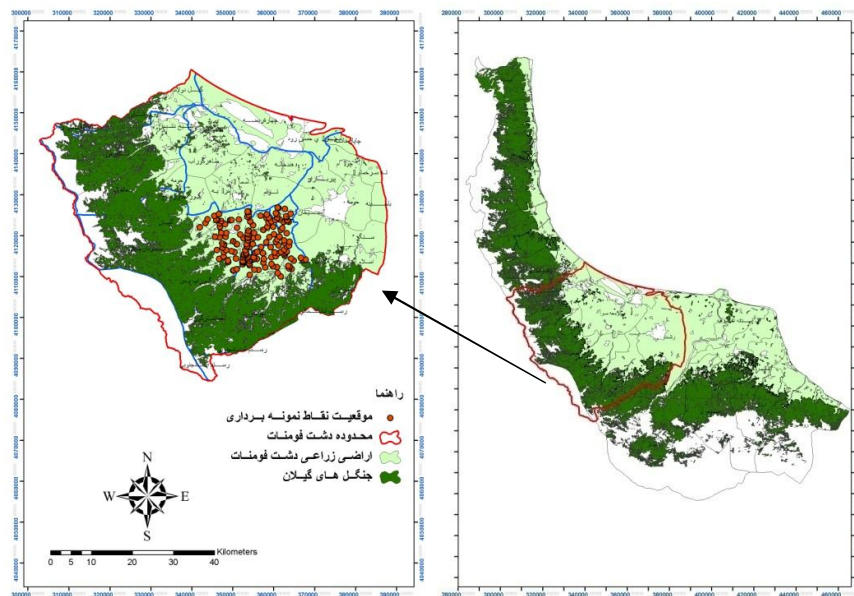
بافت خاک (درصد رس، سیلت، شن) به روش هیدرومتری (گی و دانی، 1996)، اندازه‌گیری pH گل اشباع با الکتروود شیشه‌ای (توماس، 1996)، میزان شوری خاک (ECe) در عصاره اشباع (رودس، 1996)، کربن آلی (OC) به روش اکسید کردن با اسید سولفوریک غلیظ در مجاورت دی کرومات پتاسیم (نیلسون و سامرز، 1996)، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم در pH برابر 8/2 (سامرز و میلر، 1996)، نیتروژن کل (TN) به روش کج‌دال (برمنر، 1996)، فسفر قابل استفاده (AP) به روش اولسون (کیو، 1996) و پتاسیم قابل استفاده (AK) به روش استات آمونیوم نرمال (همکل و همکاران، 1996) اندازه‌گیری شدند. علاوه بر آن با تهیه پرسشنامه، اطلاعات لازم در زمینه نوع و مقدار کود شیمیایی مصرف شده از زارعین تهیه شد.

ارزیابی کیفیت خاک دارد. ویژگیهای انتخاب شده باید محدوده‌ی گسترده‌ای از مشخصات خاک را پوشش دهد و با این حال به طور مستقیم بر کیفیت خاک اثر داشته باشد (یانگین و همکاران، 2009). لیو و همکاران (2013) با استفاده از هر دو روش TDS و MDS کیفیت خاک اراضی شالیزاری چین را بررسی نمودند.

تبدیل ویژگی‌های کمی به متغیرهای کیفی خاک به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که می‌توان به توابع خطی (آندروز و همکاران، 2002a؛ ماستو و همکاران، 2007؛ امامی و همکاران، 1393) یا غیرخطی (آندروز و همکاران، 2002 a؛ ماستو و همکاران 2007؛ تسفانگن، 2014) فازی اشاره کرد.

برای تعیین شاخص کیفیت خاک، روش‌های متعددی مانند افزایشی ساده⁴ (آماچر و همکاران، 2007)، افزایشی وزن‌دار⁵ (آندروز و همکاران، 2002) و سیستم استنتاج فازی⁶ (دابرن و ابرتور، 1997) وجود دارد. بعد از تعیین شاخص کیفیت خاک لازم است منطقه مورد مطالعه از نظر محدوده‌های همگون کیفیتی مدیریت‌پذیر تفکیک شود. رایج‌ترین روش برای تعیین محدوده ناحیه‌های مدیریتی، آن است که اراضی به بخش‌های کوچک‌تر همگون تقسیم شود (فرگوسن و همکاران، 2002). نواحی مدیریتی به عنوان یک ابزار مدیریت مکانی در کشاورزی دقیق در کاهش هزینه، بهبود مدیریت‌زراعی و کاهش محدودیت‌های زیست محیطی مؤثر هستند (فرانزن و همکاران، 2002).

دابرن و ابرتور (1997) از قوانین فازی برای ارزیابی کیفیت حاصلخیزی خاک در اراضی پست شالیزاری تحت مدیریت آبیاری در فیلیپین استفاده کردند و نشان دادند استفاده از منطق فازی می‌تواند به عنوان یک روش مفید برای تهیه نقشه‌های کیفیت حاصلخیزی خاک استفاده شود. سان و همکاران (2003) فرایندی را برای ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از زمین‌آمار و قوانین منطق فازی ارائه کردند. لیو و همکاران (2013) و کای و همکاران (2015) از تلفیق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و توابع تبدیل خطی هموستیک برای ارزیابی کیفیت خاک اراضی شالیزاری استفاده کردند. یک تقریب مؤثر دیگر برای شناسایی نواحی مدیریتی با استفاده از لایه‌های مختلف اطلاعاتی، الگوریتم خوشه‌بندی است. در گروه بندی چندمتغیره با استفاده از آنالیز خوشه‌بندی امکان تفکیک نواحی با مشخصه‌های مشابه فراهم می‌گردد. دوات‌گر و همکاران (2012) و زین‌ژانگ و همکاران (2009) از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم خوشه بندی فازی و ویژگی‌های حاصلخیزی خاک برای طراحی



شکل 1- نقشه موقعیت محدوده و توزیع نقاط نمونه برداری خاک در دشت فومنات

مطالعه از ضرایب عاملی 0/6 استفاده شد. در هر مؤلفه اصلی فقط متغیرهایی که در محدوده 10 درصد حد مطلق متغیر با بیشترین بار عاملی قرار داشتند به عنوان متغیرهای با بار عاملی بالا انتخاب شدند (آندروز و همکاران، 2002؛ ماستو و همکاران، 2007). اگر در هر مؤلفه بیش از یک متغیر باقی مانده باشد، از اندازه ضریب همبستگی خطی بین این متغیرها برای تشخیص متغیر اصلی از متغیر برکنار¹ و حذف آن‌ها استفاده می‌شود. اگر ویژگی‌های هر مؤلفه که دارای بارعاملی زیادی هستند با یکدیگر هم بسته نباشند (با فرض ضریب همبستگی خطی کمتر از 0/6) متغیر اصلی در نظر گرفته شده و در مجموعه داده‌های حداقل (MDS) می‌مانند (آندروز و کارول، 2001). تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با استفاده از نرم‌افزار SPSS16 انجام شد.

نمره‌دهی و تعیین شاخص کیفیت خاک

بعد از انتخاب MDS با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مقدار هر یک از ویژگی‌ها با استفاده از تابع نمره‌دهی خطی² (LSF) به یک تابع عضویت فازی در یک دامنه پیوسته از صفر تا یک که در آن یک نشان‌دهنده عضویت کامل و صفر نشان‌دهنده عدم عضویت در مجموعه است، تبدیل شد (دابرمن و اوبرتور، 1997). برای این مطالعه از تابع تبدیل خطی هموستیک³

تجزیه و تحلیل‌های آمار کلاسیک

گشتاورهای آمار توصیفی مانند میانگین، میانه، انحراف معیار، واریانس، تقارن (چولگی)، شکل (کشیدگی) و ضریب تغییرات برای پی‌بردن به ویژگی‌های آماری جامعه متغیرهای مورد مطالعه محاسبه شدند. علاوه بر آن ضریب همبستگی خطی پیرسون (r) بین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک بررسی شدند. برای انجام تحلیل آمار توصیفی از نرم‌افزار SPSS16 استفاده شد.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

برای انتخاب مهمترین ویژگی مؤثر در کیفیت خاک دو روش کلی، نظریه کارشناسی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) وجود دارد (آندروز و همکاران، 2002a). در این تحقیق از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تعیین ویژگی‌های مؤثر و مجموعه داده‌های حداقل استفاده شد. محققین متعددی از PCA برای ایجاد مجموعه داده حداقل (MDS) استفاده نمودند (آندروز و همکاران، 2002 a؛ ماندل و همکاران، 2011؛ ناوس و همکاران، 2011؛ موخرجی و لال، 2014). زیرا این مؤلفه‌ها تغییرات سیستم را بهتر نشان می‌دهند. در هر مؤلفه انتخابی متغیرهایی که بیشترین وزن یا ضرایب عاملی را داشته باشد در MDS باقی می‌مانند. اختصاص متغیرها به مؤلفه‌های مستقل و مختلف با توجه به مقدار ضرایب عاملی، بعد از چرخش و ریماکس عامل‌ها انجام شد. آندروز و همکاران (2002 a) ضرایب عاملی بزرگتر از 0/4 را توصیه نمودند، اما برای احتیاط بیشتر در این

¹ redundant variable

² Linear Scoring function

³ Homothetic linear transformations method

$$Y=0.1+((x-b)/(a-b))*0.9 \quad (1)$$

$$Z=1-((x-b)/(a-b))*0. \quad (2)$$

که در آن‌ها Y و Z مقادیر متغیرها بعد از تبدیل داده‌ها، X مقادیر داده‌های اولیه و b و a به ترتیب حد بحرانی پایین و بالا را در هر یک از متغیرها نشان می‌دهند. این حدود بحرانی با استفاده از حدهای پیشنهادی دابرمین و اوبرتور (1997) و نظرات کارشناسی محققین مؤسسه تحقیقات برنج کشور مشخص شد. جدول 1 مقادیر حد بالا و حد پایین را برای ویژگی‌های مطالعه شده نشان می‌دهد.

جدول 1- حدود بحرانی پایین (b) و بالا (a) برای استفاده در توابع تبدیل خطی

نام عنصر غذایی	واحد	b	a	نوع تابع خطی
pH	-	6	7	بهینه بهتر است
EC	(dS. m ⁻¹)	2	4	کمتر بهتر است
CEC	(cmol.kg)	10	20	بیشتر بهتر است
کربن آلی	(%)	1	2	بیشتر بهتر است
نیترژن کل	(%)	0/1	0/2	بیشتر بهتر است
فسفر قابل استفاده	(ppm)	6	12	بیشتر بهتر است
پتاسیم قابل استفاده	(ppm)	120	160	بیشتر بهتر است
شن	(%)	10	50	بهینه بهتر است
سیلت	(%)	0	38	بیشتر بهتر است
رس	(%)	27	35	بیشتر بهتر است

آمار مکانی

پیش از بکارگیری روش‌های آمار مکانی برای هر متغیر خاک آزمون نرمال بودن توزیع فراوانی، تشخیص داده‌های پرت و ناهمسانگردی انجام شد. برای تجزیه و تحلیل ساختار مکانی متغیرهای ناحیه‌ای مطالعه شده از نیم تغییرنما استفاده شد. نیم تغییرنما یک تابع آماری است که امکان تجزیه و تحلیل ساختار، مقیاس و شدت تغییرات مکانی متغیرهای ناحیه‌ای را فراهم می‌کند (محمدی، 1385). ویستر و اولیور (2000) حداقل نمونه مورد نیاز برای بدست آوردن یک نیم تغییرنمای پایدار را 100 نمونه ذکر کرده‌اند. در این مطالعه از 183 نمونه خاک استفاده شد. نیم تغییرنمای تجربی با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$\gamma_i(h) = \frac{1}{2w_i(h)} \sum_{j=1}^{N_i(h)} [Z_i(X_j) - Z_i(X_j + h)]^2 \quad (4)$$

استفاده شد. در اولین تابع تبدیل ویژگی خاک‌ها بر پایه اصطلاح "بیشتر بهتر است" رتبه‌بندی شدند، به طوری که ویژگی با بیشترین مقدار رتبه یک می‌گیرد و در تابع تبدیل دوم با عنوان "کمتر بهتر است"، متغیر با کمترین مقدار رتبه یک را در گروه مربوطه می‌گیرد. از رابطه 1 برای تابع تبدیل خطی "بیشتر بهتر است" ، از رابطه 2 برای تابع تبدیل خطی "کمتر بهتر است" و برای حالت "بهینه بهتر است" از ترکیب دو رابطه 1 و 2 استفاده شد (نس فان گن، 2014). با این توابع تبدیل داده‌های اولیه در دامنه بین 0/1 تا 1 قرار گرفتند (ولاسکوئز و همکاران، 2007):

پس از محاسبه تابع عضویت شاخص کیفیت خاک با رابطه زیر محاسبه گردید (ماستو و همکاران، 2007):

$$SQI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i N_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

که در آن Ni مقدار هر ویژگی پس از تبدیل است که از رابطه 1 یا 2 محاسبه شدند، n تعداد ویژگی‌های اندازه‌گیری خاک است و Wi وزن همراه هر ویژگی است. برای بدست آوردن Wi از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. هر مؤلفه اصلی (PC) مقدار معینی از تغییرات را در مجموعه داده‌ها تشریح می‌کند. با تقسیم این مقدار واریانس به حداکثر کل واریانس همه‌ی PCهای انتخاب شده برای MDS، یک مقدار وزن خاص برای متغیرهای زیر مجموعه هر PC بدست آمد. محاسبات مربوط به توابع تبدیل با استفاده از نرم‌افزار Excell انجام شد.

بر متر بود. با این حال بیشتر خاک‌ها (97 درصد نمونه خاک‌ها) دارای هدایت الکتریکی کمتر از 2 دسی‌زیمنس بر متر و در گروه خاک‌های طبیعی و بدون محدودیت قرار گرفتند. در خاک‌های دشت فومنات احتمال وجود املاح مازاد به علت بارش زیاد سالیانه کم است. میانگین سالیانه بارندگی در دشت فومنات 1278 میلی‌متر است. علت بالا بودن هدایت الکتریکی در برخی از خاک‌های اراضی مورد مطالعه به علت مواد آلی زیاد است. این مواد آلی با ایجاد ترکیبات و ماکرومولکول‌های آلی دارای بار الکتریکی در هدایت الکتریکی نقش دارند.

کربن آلی خاک در دامنه 1/03 تا 4/83 درصد با میانگین 2/47 درصد قرار دارد. مقادیر کم کربن آلی در خاک‌های شالیزاری را می‌توان به اراضی سبک بافت، اراضی واقع در سطوح شیب‌دار و یا اراضی به شکل بد تسطیح شده که در آن‌ها خاک سطحی برداشت شده‌اند، نسبت داد. در دیگر موارد وجود وضعیت اقلیمی مناسب برای افزایش ماده خشک گیاه (مانند بارش فراوان و دمای متعادل) و همچنین وجود اراضی پست شالیزاری که در بخش عمده‌ای از سال غرقاب هستند، با برقراری شرایط غیرهوازی در اراضی شالیزاری و به دنبال آن کندشدن تجزیه‌ی مواد آلی، شرایط را برای افزایش کربن آلی در خاک فراهم آورده است. غلظت فسفر قابل‌استفاده در دامنه 0/6 تا 109 با میانگین 17/11 میلی‌گرم در کیلوگرم قرار دارد. آماره میانگین به شدت به داده‌های کرانه (حداقل و حداکثر) حساس است؛ اما آماره میانه که مستقل از حد کرانه‌ای است در این متغیر به حد بحرانی 12 میلی‌گرم در کیلوگرم پیشنهادی دابرمن و فیره‌ورست (2000) نزدیک است. از سوی دیگر ضریب تغییرات زیاد (99 درصد) برای فسفر قابل‌استفاده نشان‌دهنده غیریکنواختی شدید است که به نظر می‌رسد ناشی از تحرک کم این فسفر در خاک و مصرف غیریکنواخت کود فسفره در اراضی شالیزاری مورد مطالعه باشد. نیتروژن کل در دامنه 0/11 تا 0/44 با میانگین 0/23 درصد قرار دارد. هرچند میانگین نیتروژن کل نشان‌دهنده‌ی کفایت مقدار آن در اراضی شالیزاری است، اما با توجه به نزدیک بودن آماره میانه در این ویژگی به حد بحرانی (0/2 درصد) لازم است با ارزیابی توزیع مکانی وسعت نواحی کمبود و کفایت مشخص شوند. برپایه حد بحرانی 120 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک برای پتاسیم قابل‌استفاده (کاووسی و کلباسی، 1378) و آماره میانه (125/5) میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) نزدیک به 50 درصد نمونه خاک‌ها کمبود نشان دادند.

که در آن $N_i(h)$ زوج مشاهدات، $Z_i(X_j)$ و $Z_i(X_j+h)$ مقدار متغیر i در دو نقطه X_j و X_j+h است که به فاصله h از هم قرار دارند و $\gamma_i(h)$ مقدار نیم واریانس است (ویستر و اولیور، 2000). برای تعیین بهترین مدل (اثر قطعه‌ای خالص، خطی، نمایی و کروی) برازش شده بر نیم تغییرنمای تجربی از آماره‌های مجموع مربعات باقیمانده¹ (RSS) و ضریب تبیین² (R^2) استفاده شد. برای تعیین اندازه و شدت وابستگی مکانی از شاخص‌های نسبت همبستگی مکانی یا به عبارت دیگر نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه (کمباردلا و همکاران؛ 1994) و میانگین فاصله همبستگی³ (MCD) با استفاده از روابط زیر استفاده شد (کاهن و همکاران، 1993؛ کالیتا و همکاران، 2007):

$$MCD = \frac{3}{8} \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) \times a \quad (6)$$

برای مدل نمایی

$$MCD = \frac{ac}{3(C + C_0)(1 - e^{-3})}$$

که در آن a شعاع تأثیر، C آستانه و C_0 اثر قطعه‌ای است.

برای درون‌یابی و تهیه نقشه توزیع مکانی برای آن گروه از ویژگی‌ها که از مدل نیم تغییرنمای دارای آستانه پیروی می‌نمودند از کریجینگ بلوکی⁴ و برای ویژگی‌های دیگر که از مدل تغییرنمای اثر قطعه‌ای خالص پیروی نموده و فاقد تغییرات نظام‌مدار و ساختار مکانی بودند از روش وزن‌دهی عکس فاصله⁵ استفاده شد.

برای ارزیابی صحت برآورد از روش اعتبارسنجی جک نایف و آماره‌های میانگین خطا⁶ (ME) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده⁷ (NRMSE) استفاده شد. ارزیابی ساختار مکانی با استفاده از نرم‌افزار GS+ (نسخه 5.1) و پهنه‌بندی ویژگی‌ها و شاخص‌های کیفی خاک با استفاده از Arc GIS (نسخه 9.3) انجام شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی

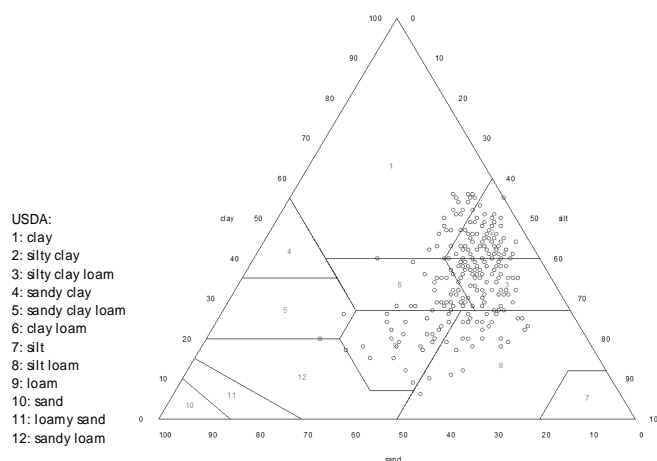
آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک در جدول 2 نشان داده شدند. دامنه هدایت الکتریکی در اراضی شالیزاری دشت مطالعه شده بین 0/12 تا 3/8 دسی‌زیمنس

1. Residual sum of square
2. Determination of coefficient
3. Mean correlation distance
4. Block kriging
5. Inverse weighting distance
6. Mean of error
7. Normalized of root mean square of error

جدول 2- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک در اراضی شالیزاری مورد مطالعه در جنوب دشت فومنات

متغیر	واحد	میانگین	میان	حداقل	حداکثر	واریانس	چولگی	کشی‌دگی	ضریب تغییرات
هدایت الکتریکی	دسی‌زیمنس بر متر	1/44	1/26	0/12	3/81	0/45	0/51	0/32	46/4
pH	-	6/45	6/41	3/91	7/66	0/42	-0/56	0/81	10/03
گنجایش تبادل کاتیونی	سانتی‌مول بر کیلوگرم	27/72	27	10	47	49/06	0/22	0/14	25/27
کربن آلی	درصد	2/47	2/26	1/03	4/83	0/55	0/68	0/18	19/16
نیتروژن کل	درصد	0/23	0/21	0/11	0/44	0/01	0/65	0/25	28/15
فسفر قابل استفاده	میلی‌گرم بر کیلوگرم	17/11	11/40	0/6	109	278/44	2/65 *	8/66 *	99/06
پتاسیم قابل استفاده	میلی‌گرم بر کیلوگرم	1/35	125	52	394	3090	1/47 *	3/19 *	41/06
رس	درصد	27/70	40	6	56	105/08	-0/56	0/12	27/19
شن	درصد	11/11	12	1	52	96/86	-0/57	0/72	12/92
سیلت	درصد	46	47	26	58	26/08	1/304*	1/52 *	62/25

* معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد



شکل 2- پراکنش توزیع اندازه ذرات نمونه خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه در مثلث بافت خاک

تعیین مجموعه داده حداقل (MDS) و شاخص کیفیت خاک (SQI)

نتایج ضریب همبستگی خطی ویژگی‌های مطالعه شده در جدول 3 نشان داده شد. در 23 از 45 مورد بین ویژگی‌های خاک همبستگی خطی معنی‌دار بین پنج و یک درصد وجود دارد؛ از این رو به نظر می‌رسد تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای تلفیق و خلاصه نمودن تغییرات این ویژگی‌ها مؤثر باشد. برپایه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی چهار مؤلفه با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک (که 75 درصد از تغییرات را تشریح می‌نمودند) برای تحلیل انتخاب شدند (جدول 4).

ویژگی‌های فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده و سیلت دارای چولگی و کشی‌دگی معنی‌داری بودند. چولگی معنی‌دار دلالت بر غیرنرمال بودن توزیع فراوانی دارد و هر اندازه مقدار آن بیشتر شود بیانگر غیریکنواخت بودن واریانس و وجود داده‌های کرانه‌ای است. در این ویژگی‌ها، آماره میانگین نیز از میانگین متفاوت بود. انطباق توزیع اندازه ذرات معدنی خاک بر مثلث بافت نشان داد که خاک‌های شالیزاری ناحیه مورد مطالعه عمدتاً به ترتیب در کلاس‌های بافتی نسبتاً سنگین رسی سیلتی و لوم رسی سیلتی قرار دارند (شکل 2).

جدول 3- ضریب‌های همبستگی خطی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اراضی شالیزاری جنوب دشت فومنات

	EC	pH	CEC	OC	TN	AP	AK	Sa	Si
pH	0/05								
CEC	0/12	-0/08							
OC	0/25**	0/02	0/47**						
TN	0/2*	0/01	0/40*	0/91**					
AP	0/04	-0/02	-0/04	0/05	0/06				
AK	0/09	0/00	0/33*	-0/02	0/03	0/40**			
Sa	-0/07	0/08	-0/30**	-0/12*	0/17*	0/55**	-0/02		
Si	0/00	0/1	0/28**	0/17**	0/14*	0/12	0/36**	0/26**	
C	0/10	0/14*	0/46**	0/00	0/25**	0/45**	0/25*	-0/76**	-0/43**

* معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

***EC: هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک)، OC: کربن آلی (%، TN: نیتروژن کل (%، AP: فسفر قابل استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم)، AK: پتاسیم قابل استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم)، Sa: شن (%، Si: سیلت (% و C: رس (%).

جدول 4- تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و بارعاملی برای ویژگی‌های خاک

PC ₄	PC ₃	PC ₂	PC ₁	
1/03	1/88	2/25	2/39	ارزش ویژه
10/25	18/75	22/5	24/00	واریانس (%)
75/46	65/21	46/50	24/00	واریانس تجمعی
بار عاملی برای هر ویژگی خاک				
0/09	0/01	0/36	-0/06	EC
0/95	0/08	0/04	0/06	pH
0/02	0/33	0/71	0/33	CEC
-0/02	0/25	0/88	0/28	OC
-0/03	-0/14	0/86	0/40	TN
-0/19	0/60	-0/06	0/58	AP
-0/18	0/75	0/23	-0/16	AK
0/11	0/38	-0/15	0/83	Sa
-0/16	-0/77	-0/00	0/25	Si
-0/06	0/13	0/15	-0/96	C

EC: هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)، CEC: گنجایش تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک)، OC: کربن آلی (%، TN: نیتروژن کل (%، AP: فسفر قابل استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم)، AK: پتاسیم قابل استفاده (میلی‌گرم در کیلوگرم)، Sa: شن (%، Si: سیلت (% و C: رس (%).

فسفر، پتاسیم قابل استفاده و سیلت دارای ضریب همبستگی خطی زیاد ($r > 0.6$) نبودند و در نتیجه به عنوان متغیرهای اصلی انتخاب شدند. در مؤلفه اصلی چهارم (PC₄) فقط pH دارای بیشترین بار عاملی (0/95) و با دیگر ویژگی‌ها نیز دارای همبستگی خطی نبود (جدول 3) و بنابراین در MDS در نظر گرفته شد. سپس ارزش هر یک از این ویژگی‌های انتخاب شده با استفاده از توابع تبدیل خطی (روابط 1 و 2) به مقادیر بین صفر تا یک تبدیل شدند و به دنبال آن مقدار SQI برای هر نمونه

در مؤلفه اصلی اول (PC₁) ویژگی‌های رس و شن دارای بیشترین بارعاملی بودند (جدول 4). این دو ویژگی دارای ضریب همبستگی خطی برابر با -0/76 (بیش از 0/6) بودند (جدول 3). با توجه به آنکه در بین این دو ویژگی، رس دارای بیشترین بارعاملی (-0/96) بود، از این رو به عنوان یکی از ویژگی‌ها در MDS انتخاب گردید. بر همین پایه در مؤلفه اصلی دوم (PC₂)، گنجایش تبادل کاتیونی و کربن آلی به عنوان متغیر اصلی انتخاب شد (جدول 4). در مؤلفه اصلی سوم (PC₃) سه ویژگی

درصد نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی، 25 تا 75 درصد متوسط و بیش از 75 درصد دارای وابستگی مکانی ضعیف است. دفرا و همکاران (2007) نیز نشان دادند که متغیرهای با وابستگی مکانی ضعیف دارای ضریب تبیین کمتر از 0/5 هستند. متغیرهای کربن آلی و فسفر قابل استفاده با پیروی از مدل اثر قطعه‌ای خالص و ضریب تبیین کمتر از 0/5 فاقد ساختار مکانی بودند که نشان‌دهنده وجود تغییرات تصادفی است (جدول 5). دیگر ویژگی‌ها دارای وابستگی مکانی متوسط بودند. وابستگی مکانی متوسط ممکن است به علت ترکیبی از اثر عوامل ذاتی تشکیل دهنده خاک و عوامل بیرونی (مانند مصرف کود و عملیات کشت) باشد. گروه‌بندی کمباردلا و همکاران (1994) دارای محدودیت‌هایی از جمله در نظر نگرفتن دامنه تأثیر است (ویندورف و ژو، 2010). برای رفع این محدودیت از شاخص MCD استفاده شد.

خاک مورد مطالعه با استفاده از ویژگی‌های MDS محاسبه شدند:

$$(7) \quad 0/188 \text{ AK} + 0/188 \text{ AP} + 0/104 \text{ pH} / 1/73$$

$$\text{SQI} = (0/240 \text{ Clay} + 0/225 \text{ CEC} + 0/325 \text{ OC} +$$

ساختار مکانی ویژگی‌های MDS

ساختار مکانی ویژگی‌های مؤثر در شاخص کیفیت خاک از طریق مؤلفه‌های مدل‌های نیم‌تغییرنما در جدول 5 نشان داده شدند. متغیرهای فسفر و پتاسیم قابل استفاده که دارای چولگی و کشیدگی معنی‌دار بودند (جدول 2)، پیش از تجزیه آمار مکانی با تبدیل لگاریتمی دارای توزیع فراوانی نرمال شدند. از نسبت همبستگی مکانی (اثر قطعه‌ای به آستانه) برای تعیین شدت وابستگی مکانی متغیرها استفاده می‌شود (کمباردلا و همکاران، 1994). نسبت کمتر از 25

جدول 5- مؤلفه‌های مدل‌های نیم‌تغییرنما برای ویژگی‌های MDS و شاخص کیفیت خاک

MCD (متر)	RSS	R ²	نسبت همبستگی مکانی ¹	دامنه (متر)	آستانه (C ₀ +C)	اثر قطعه‌ای (C ₀)	مدل	واحد	ویژگی
454	1/1×10 ⁻³	0/68	74	5500	0/46	0/24	نمایی	-	pH
-	3/8×10 ⁻⁵	0/02	100	-	0/082	0/082	اثر قطعه‌ای خالص	درصد	OC
1033	14	0/97	50	5500	52/1	26	کروی	سانتی‌مول بر کیلوگرم	CEC
1346	16/4	0/99	45	6500	105	47	کروی	درصد	C
1116	0/22	0/95	56	6700	5/4	2	کروی	میلی‌گرم در کیلوگرم	AK
-	5/2×10 ⁻³	0/05	100	-	0/60	0/60	اثر قطعه‌ای خالص	میلی‌گرم در کیلوگرم	AP
-	2/1×10 ⁻⁶	0/02	100	-	0/019	0/019	اثر قطعه‌ای خالص	-	AQI

ساختار مکانی و فاصله همبستگی مکانی در مقیاس متفاوتی عمل می‌کنند.

پهنه‌بندی ویژگی‌های pH، گنجایش تبادل کاتیونی، رس و پتاسیم قابل استفاده که از مدل‌های نیم‌تغییرنمای دارای آستانه پیروی می‌نمودند از روش کریجینگ و برای دیگر ویژگی‌ها و شاخص کیفیت خاک که فاقد ساختار نظام‌دار مکانی بودند از روش وزن‌دهی عکس فاصله انجام شد (شکل 3). بیشتر اراضی شالیزاری مورد مطالعه (72 درصد از اراضی) دارای شاخص کیفیت خاک 0/5 - 0/75 بودند. مقایسه نقشه‌ها نشان دادند که مهم‌ترین عامل محدود کننده در این اراضی غلظت کمتر از حد بحرانی فسفر و پتاسیم قابل استفاده است (شکل 3-ج و 3-ه). بخشی از اراضی شالیزاری جنوب غربی (7

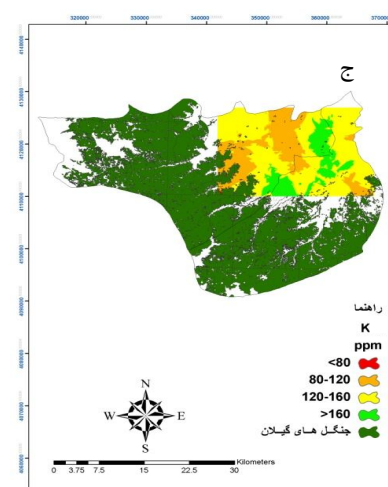
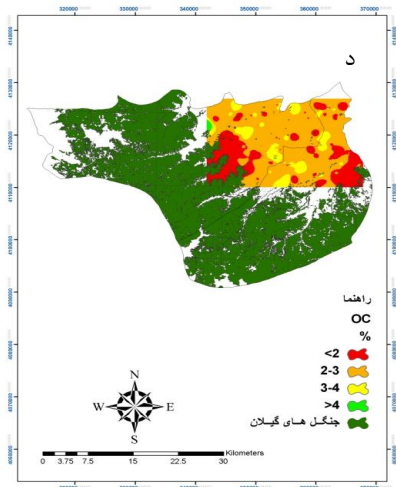
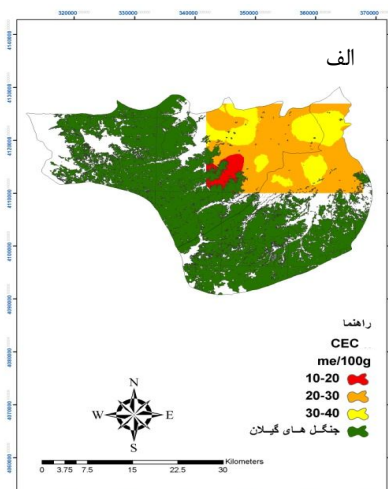
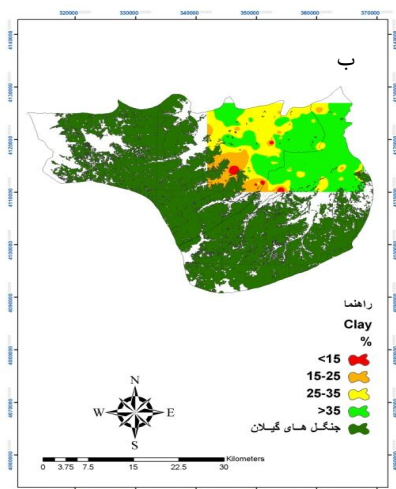
مزیت MCD در این است که نه تنها مقدار واریانس قطعه‌ای، آستانه و دامنه تأثیر را با هم در نظر می‌گیرد، بلکه مشخص کننده حداکثر فاصله‌ای است که ویژگی‌ها از نظر مکانی خودهمبسته¹ هستند (گرپین تراک و همکاران، 2007). بر این پایه ویژگی رس دارای بزرگترین MCD در متغیرهای مورد مطالعه بود.

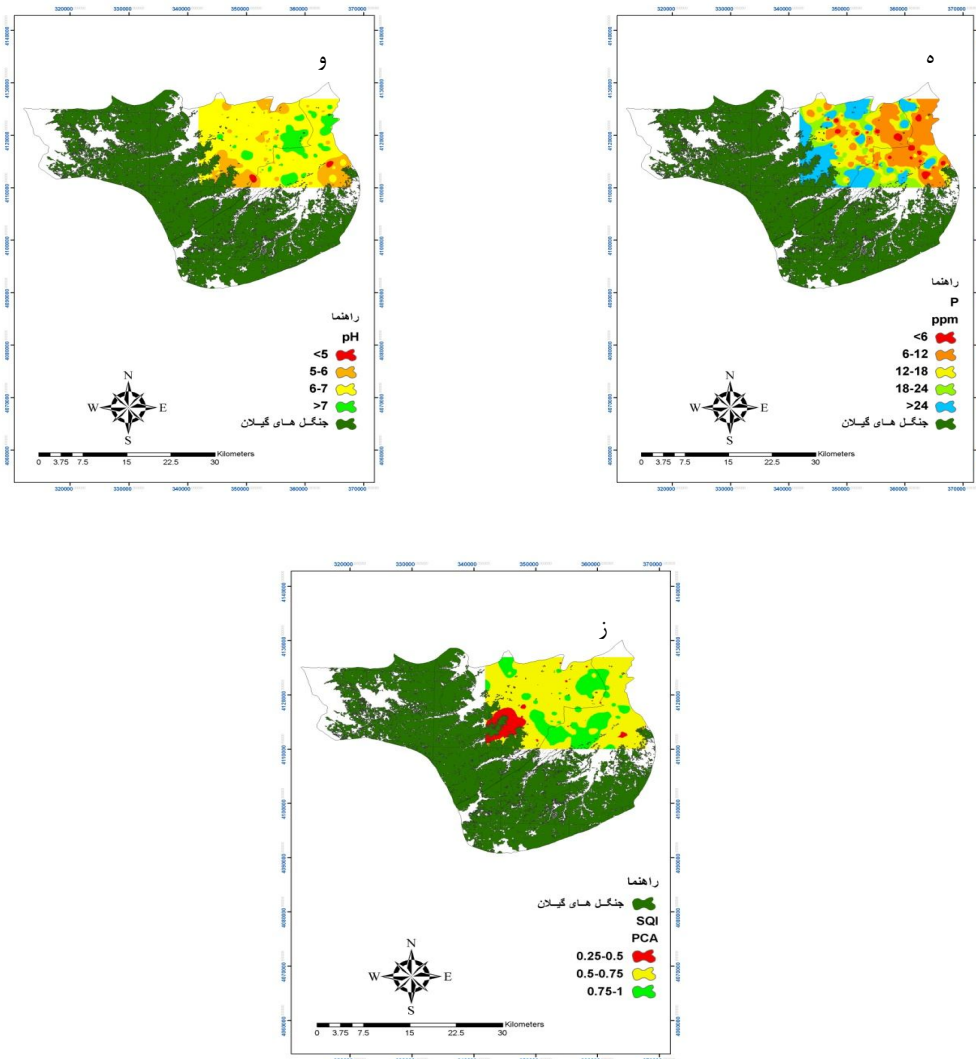
شاخص کیفیت خاک (SQI) نیز از مدل اثر قطعه‌ای خالص بدون ساختار مکانی پیروی نمود. این شاخص تلفیقی از ویژگی‌های pH، رس، گنجایش تبادل کاتیونی، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده است (رابطه 7) که هر یک از آن‌ها از نظر شدت

¹ Auto corrected

تبادل و عرضه آن به گیاه برنج موثر هستند (دابرنم و ابرتور، 1997). از این رو انتظار می‌رود خاک‌های با رس، کربن آلی، گنجایش تبادل کاتیونی کم از توانایی کمتری در نگهداری و عرضه این عناصر به گیاه برخوردار باشند. کربن آلی کم خاک توانایی عرضه نیتروژن بومی برای گیاه برنج را نیز محدود می‌کند (دابرنم و ابرتور، 1997).

درصد از اراضی) از شاخص کیفیت خاک (0/5 تا 0/25) کمتری نسبت به دیگر اراضی برخوردار بودند (شکل 3-3). اراضی این ناحیه از رس، کربن آلی، گنجایش تبادل کاتیونی و پتاسیم قابل استفاده کمتری نسبت به دیگر اراضی برخوردار بودند (شکل 3-3 الف تا د). رس و کربن آلی بر ظرفیت نگهداری آب در خاک مؤثر هستند. از سوی دیگر این ویژگی‌ها در نگهداری کاتیون‌های قابل





شکل 3- بازنمایی ویژگی‌های مرتبط با شاخص کیفیت خاک؛ الف) گنجایش تبادل کاتیونی، ب) رس، ج) پتاسیم قابل استفاده، د) کربن آلی، ه) فسفر قابل استفاده، و) pH و ز) شاخص کیفیت خاک

کیلوگرم فسفر و 20-40 کیلوگرم پتاسیم در هر سال زراعی از منابع کودی فسفر و پتاسیم به خاک اضافه شود. علیرغم کمبود پتاسیم و فسفر قابل استفاده در بخش بزرگی از خاک‌های اراضی شالیزاری مورد مطالعه، توزیع کود فسفر و پتاسیم در میان شالیکاران منطقه مناسب نبوده است. نتایج ارزیابی پرسشنامه‌ها از زارعین نیز نشان داد که مقدار مصرف کودهای نیتروژنه که در منطقه از محدودیت کمتری برخوردار بود نسبت به کودهای فسفر و پتاسیم (که کمبود آن در منطقه رایج‌تر است) بیشتر بوده است. به نظر می‌رسد عواملی مانند عدم آگاهی از نقش عناصر پتاسیم و فسفر در افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه برنج، فقدان منابع کافی از کودهای

بهاسکار و سرکار (2013) با ارزیابی توانایی و کیفیت خاک بخشی از اراضی شالیزاری آسام هند نشان دادند که عناصر روی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد برنج هستند. لیو و همکاران (2015) با ارزیابی کیفیت خاک در اراضی شالیزاری، با بهره‌وری متفاوت نشان دادند که کمبود فسفر قابل استفاده و نیتروژن کل مهم‌ترین عامل محدود کننده رشد گیاه برنج هستند. دابرن و فیرهورست (2000) تأکید دارند که حتی در مزارع حاصلخیز با برداشت فسفر و پتاسیم توسط کاه و دانه برنج با عملکرد 4 تن شلتوک در هکتار (نزدیک به رقم هاشمی) لازم است معادل 8-12

کنار کشت پیوسته برنج بدون مصرف کودهای حاوی پتاسیم سبب شده که غلظت پتاسیم قابل استفاده در این ناحیه کاهش یابد. بیشتر دیگر اراضی شالیزاری دارای کیفیت خاک متوسط بوده و دارای غلظت کمتر از حد بحرانی فسفر و پتاسیم قابل استفاده بودند که متأثر از عوامل مدیریتی بیرونی مانند عدم مصرف یا مصرف کم کودهای حاوی پتاسیم و فسفر هستند. از این رو برای دستیابی به تولید پایدار اقتصادی در اراضی شالیزاری مورد مطالعه مدیریت توزیع و مصرف بهینه کودهای شیمیایی حاوی پتاسیم و فسفر ضروری است.

پتاسیم و فسفر در ناحیه، افزایش قیمت کود و وجود کودهای با کیفیت کم در عدم استقبال زارعین نسبت به مصرف کودهای پتاسه و فسفره مؤثر بوده است.

نتیجه گیری

پایش کیفیت حاصلخیزی در ناحیه مطالعه شده نشان داد که اراضی شالیزاری با کیفیت حاصلخیزی بد که در جنوب غربی ناحیه مورد مطالعه قرار داشتند عمدتاً متأثر از عوامل ذاتی ایستای خاک مانند رس، کربن آلی و گنجایش تبادل کاتیونی خاک قرار داشتند. کاهش کمیت این ویژگی‌ها که بر قابلیت تبادل پتاسیم اثر منفی دارد؛ در

فهرست منابع:

1. امامی، ح.، ع. ر. آستارایی و ا. فتوت. 1393. ارزیابی تأثیر مواد آلی بر توابع نمره‌دهی کیفیت خاک. نشریه آب و خاک، جلد 28، شماره 3، صفحات: 575-565.
2. شهاب آرخالو، ح.، ح. امامی، غ. حق نیا و ع. کریمی. 1390. تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شاخص‌های کیفیت خاک در بخشی از زمین‌های کشاورزی و مرتعی جنوب مشهد. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 25، شماره 5، صفحات: 1207-1197.
3. کاوسی، م.، و م. کلباسی. 1378. مقایسه روش‌های عصاره‌گیری پتاسیم خاک برای تعیین سطح بحرانی پتاسیم برای برنج در تعدادی از خاک‌های شالیزاری استان گیلان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد 3، شماره 4، صفحات: 70-57.
4. محمدی، ح. 1385. پدومتری (جلد دوم - آمار مکانی). انتشارات پلک، 453 صفحه.
5. Andrews, S.S., and C.R. Carroll. 2001. Designing a decision tool for sustainable agroecosystem management: soil quality assessment of a poultry litter management case study. *Ecol. Appl.*, 11 (6), in press.
6. Amacher, M.C., and C.H. Perry. 2007. Soil vital signs: A new Soil Quality Index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 12 p
7. Andrews, S., D. Karlen, J. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90: 25-45.
8. Andrews, S.S., J.P. Mitchell, R. Mancinelli, K.L. Karlen, T.K. Hartz, W.R. Horwath, G.S. Pettygrove, K.M. Scow, and D.S. Munk. 2002. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agron.* 94: 12-23.
9. Aparicio, V., and J.L. Coasta. 2007. Soil quality indicators continuous cropping systems in the Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.* 96: 155-165.
10. Bhaskar, B. P., and D. Sarkar. 2013. Capability and quality assessment of rice grazing hydric soils in Majul river Island, Assam, India. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*. 107(1): 13-32.
11. Bindraban, P.S., J.J. Stoorvogel, D.M. Jansen, J. Vlaming, and J.J.R. Groot. 2000. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agric. Ecosyst. Environ.* 81: 103-112.
12. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen. Total. P. 1058- 1121. In D. W. Nelson, et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods*. SSSA, Madison, WI.
13. Cahn, M.D., J.W. Hummeland, and B.H. Bruer. 1993. Spatial analysis of soil fertility for site specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1240-1248.

14. Cambardella, C. A., A.T. Moorman, J. M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco, and A.E. Konopka. 1994. Field-scale heterogeneity of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501–1511.
15. Davatgar, N., M.R. Neishabouri, and A.R. Sepaskhah. 2012. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. *Geoderma*, 173: 111-118.
16. Ditzler, C.A., and A.J. Tugel. 2002. Soil quality field tools of USDANRCS soil quality institute. *Agron.* 94: 33-38.
17. Doberman, A., and T. Fairhurst. 2000. Rice nutrient disorders and nutrient management. International Rice Research Institute.
18. Dobermann, A., and T. Oberthur. 1997. Fuzzy mapping of soil fertility- a case study on irrigated rice land in the Phillipines. *Geoderma*, 77: 317. 339.
19. Doran, J.W., and B.T. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. In Doran, J.W., D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart (Eds.) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA, Madison, WI.
20. Duffera. M., J. G. White, and R. Weisz. 2007. Spatial variability of Southeastern U. S. coastal plain soil physical properties: Implications for site specific management. *Geoderma*, 137: 327-331.
21. Ferguson, R.B., G.W. Hergert, J.S. Schepers, C.A. Gotway, J. E. Cahoon, and T.A. Peterson. 2002. Site- specific nitrogen management of irrigated maize: yield and soil residual nitrate effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 544-553.
22. Franzen, D.W., D.H. Hopkins, M.D. Sweeney, M.K. Ulmer, and A.D. Halvorson. 2002. Evaluation of soil survey scale for zone development of site specific nitrogen management. *Agron. J.* 94: 381-384.
23. Gee, W.G., and O. Dani. 1996. Particle size analysis. P. 475-490. In G.S. Campbell et al. (Eds.) *Part 4. Physical methods*. SSSA, Madison, WI.
24. Govoerts, B., K.D. Sayre, and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.* 87: 163- 174.
25. Griepentrag, H.W., E. Thiessen, H. Kristensen, and L. Knudsen. 2007. A patch- size index to assess machinery to match soil and crop spatial variability. *Precision Agriculture.* 7: 407-413.
26. Helmke, P.A., and D.L. Sparks. 1996. Lithium, Potassium, Rubidium and Cesium, p. 551-574. In D.W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods*. SSSA, Madison, WI.
27. Kalieta, A.L., M.C. Hirschi, and F. Tian. 2007. Field-Scale Surface Soil Moisture Patterns and Their Relationship to Topographic Indices. *Transactions of the ASABE.* 50(2): 557–564.
28. Klingebiel, A.A., and P.H. Montgomery. 1961. Land capability classification. *USDA Handbook, Vol. 210*. United State. Department of Agricultura, Washington, DC.
29. Kuo, S. 1996. Phosphorous. P. 869- 919. In D. W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical methods*. SSSA, Madison, WI.
30. Liu, Z. J., W. Zhou, J.b. shen, S.T. Li, G.Q. Liang, X.B. Wang, J.W. Sun, and C. AI. 2013. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivity in Guangdong province, China. *Journal of Integrative Agriculture.* 319(13): 60594-8.
31. Liu, Z. J., W. Zhou, J. Lv, P. He, G. Liang and H. Jin. 2015. A simple evaluation of soil quality of water logged purple paddy soils with different productivities. *PLOS ONE.* 10 (5): e0127690.

32. Mandal, U.K., K. Ramachandran, K. Sharma, B. Satyam, and K. Venkanna. 2011. Assessing Soil Quality in a Semiarid Tropical Watershed Using a Geographic Information System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1144-1160.
33. Masto, R.E., P. K.Chhonkar, D. Singh, and A. Patra. K.2007. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 118: 130–142, 2007.
34. Mukherjee, A., and R. Lal. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. *PloS One*, 9(8): 1-15.
35. Navas, M., M. Benito, I. Rodriguez, and A. Masaguer .2011. Effect of five forage legume covers on soil quality at the Eastern plains of Venezuela. *Applied Soil Ecology*, 49: 242–249.
36. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. P. 961-1010. In D.W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA. Madison, Wisconsin.
37. Qi. Y., L.D. Jeremy, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in agricultural region of Jiagsu province, China. *Geoderma*, 144: 325- 334.
38. Reyniers, M., K. Maertens, E. Vrindts, and J. De Baerdemaeker. 2006. Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil Till. Res.* 88: 262- 273.
39. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids, p. 417-435. In D.W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical methods.* SSSA. Madison, Wisconsin.
40. Stocking, M.A. 2003. Soil and Food Security: The Next 50 Years. *Science*, 302: 1356-1359.
41. Sumner, M.E. and W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. P. 1201-1229. In D.W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA. Madison, Wisconsin.
42. Sun, B., Sh. Zhou, and Q. Zhao. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of suberropical china. *Geoderma*, 115: 85-99.
43. Tesfahunegn, G. B. 2014. Soil quality assessment strategies for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science.* 1-14.
44. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. P. 475-490. In D.W. Nelson et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods.* SSSA. Madison, Wisconsin.
45. Velasquez, E., P. Lavelle, and M. Andrade. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry.* 39(12): 3066-3080.
46. Webster, R., and M.A. Oliver. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*, Oxford University Press. New York.
47. Weindorf, D.C., and Y. Zhu. 2010. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: Implications for Sampling Strategy. *Pedosphere*, 20(2): 185-197.
48. Xin-Zhong, W., L. Guo-Shun, H. Hong-Chao, W. Zheng-Hai, L. Qing-Hua, L. Xu-Feng, H. Wei-Hong, and L. Tan-Tao. 2009. Determination of management zone for a tobacco field based on soil fertility. *Computers and Electronics in Agriculture.* 65: 168-175.
49. Yanbing, Q., J.L. Darilek, H. Biao, Z. Yongcun, W. Sun, and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149: 325-334.

Spatial Variability of Paddy Fields Soil Fertility in Southern Part of Foumanat Plain, Iran

N. Davatgar¹, M. Shakouri Katigari, L. Rezaee, B. Delsooz Khaki, H. Shokri Vahed, and M. Kavooosi

Associated Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj; E-mail: n_davatgar@yahoo.com

PhD student, Dept. Soil Science, Agricultural Faculty, Guilan University;
E-mail: maryamshakouri@ymail.com

PhD student, Dept. Soil Science, Agricultural Faculty, Shiraz University;
E-mail: l.rezaee77@gmail.com

Researcher, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj; E-mail: b_delsooz@yahoo.com

Researcher Instructor, Academic member, Rice Research Institute of Iran (RRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rasht; E-mail: shokri_v@yahoo.com

Associate Professor, Academic member, Rice Research Institute of Iran (RRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rasht; E-mail: masoud_kavooosi2@yahoo.com

Received: July, 2018 and Accepted: July, 2019

Abstract

A comprehensive assessment of agricultural soils quality is essential for making wise decision that leads to sustainable production and environmental preservation. Many studies have shown that soil quality index, based on a combination of soil characteristics, can describe soil conditions better than individual soil characteristics. In this study, to evaluate the soil quality, first, a minimum data set was made by using the principal component analysis. Then, quantitative characteristics of the soil were quantified through scoring. Finally, by weighting each attribute (through the principal component analysis), soil quality index (SQI) was obtained and converted to map by GIS software. The results showed that most of the soils (97% of soil samples) had electrical conductivity less than 2 dS/m and they were in the group of natural soils without limitation. Most of the studied paddy soils had a good pH and no special limitation. The average of available phosphorus concentration was more than the critical level (12 mg/kg) because of the presence of a number of high concentration samples, while there was a poor phosphorous situation in more than 50% of the region. Nearly 76 percent of the studied regions had total nitrogen higher than 0.2 percent, which indicated the relative adequacy of this nutrient element in most of the land. The concentration of available potassium in most of the studied areas was less than the critical level. Mapping of the soil quality index showed that some paddy fields had poor fertility quality because of the limitation of soil intrinsic and static properties such as clay, organic carbon, and cation exchange capacity. However, most of the studied lands had moderate fertility quality and the most important limiting factor was the shortage of available phosphorus and potassium, while the use of phosphorus and potassium fertilizers was low in this area.

Keywords: Guilan Province, GIS mapping, Principal component analysis, Soil quality index

¹ Corresponding author: Karaj, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute of Iran.