

## کاربرد حداقل مجموعه داده‌ها برای ارزیابی کمی و بررسی خودهمبستگی فضایی کیفیت خاک در اراضی جنوب غربی دشت ارومیه

علی باریکلو<sup>۱</sup>، سالار رضاپور<sup>۲\*</sup>، پریسا علمداری<sup>۱</sup> و روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۲۲)

### چکیده

کیفیت خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تأثیرگذار بر تولیدات زراعی و پایداری تولید است. عوامل فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و اکولوژیکی یک خاک بر کیفیت خاک تأثیرگذارند. اندازه‌گیری همه شاخص‌های کیفیت خاک طاقت‌فرسا و هزینه‌بر است؛ بنابراین بسیاری از پژوهشگران ارزیابی را بر تعداد محدودی از شاخص‌های کیفیت خاک متمرکز کرده‌اند. این پژوهش با هدف تعیین حداقل مجموعه داده‌ها برای ارزیابی کمی و بررسی خودهمبستگی فضایی کیفیت خاک در اراضی جنوب غربی دشت ارومیه انجام شد. برای این منظور تعداد ۱۲۰ نمونه مرکب (عمق ۶۰-۰ سانتی‌متر) از خاک برداشته و شاخص کیفیت خاک به روش IQIW در ۴ حالت مجموعه کل - خطی (IQIwL\_TDS)، کل - غیرخطی (IQIwNL\_TDS)، حداقل - خطی (IQIwL\_MDS) و حداقل - غیرخطی (IQIwNL\_MDS) محاسبه شد. برای انتخاب مجموعه داده‌ها، تعداد ۲۲ ویژگی فیزیکی و شیمیایی به‌عنوان ویژگی انتخابی برای روش کل داده‌ها (TDS) و ویژگی‌های درصد شن، نسبت جذب سدیم، ظرفیت تبادل کاتیونی، فسفر قابل جذب، کربنات کلسیم فعال و غلظت نیکل با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌عنوان مجموعه حداقل داده‌ها (MDS) انتخاب شدند. بیشترین مقدار شاخص کیفیت خاک در حالت IQIMDS خطی و کمترین مقدار در حالت IQIMDS غیرخطی حاصل شد. بررسی ضریب همبستگی خطی و غیرخطی بین شاخص کیفیت خاک با دسته کل و حداقل داده‌ها نشان داد، حالت غیرخطی شاخص IQI ضریب همبستگی بالاتری ( $R^2=0/85$ ) نسبت به حالت خطی شاخص IQI ( $R^2=0/73$ ) دارد. نتایج محاسبه شاخص موران جهانی برای داده‌های شاخص کیفیت خاک IQIW در مجموعه‌های مطالعاتی نشان داد، داده‌های کیفیت خاک دارای خودهمبستگی فضایی هستند و به‌صورت خوشه‌ای در فضا توزیع یافته‌اند و مستقل از یکدیگر نیستند. نتایج آماره گتیس - ارد جی نشان داد، خوشه‌های با کیفیت خاک ضعیف، شوره‌زارهای ایجاد شده در اثر خشک‌شدن دریاچه ارومیه و اراضی بایر اطراف آن در بخش شرق و جنوب شرق محدوده مطالعاتی را شامل شده است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی، تجزیه به مؤلفه اصلی، شاخص موران جهانی، آماره گتیس - ارد جی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اردکان، یزد، ایران

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: S.Rezapour@urmia.ac.ir

## مقدمه

طی سال‌های اخیر، استفاده پایدار از منابع طبیعی و ایجاد تعادل بین میزان تولید و بهبود کیفیت منابع طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، خاک به‌عنوان جزء بسیار مهم در پایداری زیست‌بوم‌ها به شمار می‌آید و مطالعه وضعیت آن برای دستیابی به توسعه پایدار و استفاده بهینه از منابع طبیعی ضروری است؛ در این میان کیفیت خاک به‌عنوان یکی از روش‌های بررسی وضعیت خاک معرفی شده است (۱۷). کیفیت خاک به طور گسترده به‌عنوان ظرفیت خاک برای عملکرد در محدوده اکوسیستم و کاربری اراضی برای حفظ بهره‌وری بیولوژیکی، حفظ کیفیت محیطی و ارتقای سلامت گیاهان و حیوانات تعریف شده است (۱۲). کیفیت خاک را می‌توان برای اکوسیستم‌های کشاورزی که در آن خدمات اصلی و نه انحصاری اکوسیستم بهره‌وری است و برای اکوسیستم‌های طبیعی که اهداف اصلی آن حفظ کیفیت محیطی و حفاظت از تنوع زیستی است، ارزیابی کرد (۶). ارزیابی کیفیت خاک، اطلاعات جامعی را برای مطالعه شرایط خاک در پاسخ به روش‌های مدیریتی و معرفی مدیریت مناسب برای شرایط فعلی اراضی و ظرفیت تولیدی اراضی در آینده فراهم کرده است (۵) و به‌عنوان راهکاری انعطاف پذیر برای مطالعه شرایط خاک در پاسخ به روش‌های مدیریتی و برآورد تحمل در برابر تنش‌های ناشی از عامل‌های طبیعی و بشری معرفی شده است (۱).

یکی از اجزای مهم ارزیابی کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک است (۶) که به ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری خاک اشاره دارد که بر ظرفیت خاک برای تولید محصول یا عملکردهای محیطی تأثیر می‌گذارد (۳). در کنفرانس بین‌المللی ارزیابی و پایش کیفیت خاک، سه مؤلفه اساسی شاخص کیفیت خاک، شامل: ۱. توانایی خاک برای افزایش تولید محصول (مؤلفه بهره‌وری)، ۲. توانایی خاک برای عملکرد در تضعیف آلاینده‌های محیطی، پاتوژن‌ها و آسیب‌های خارج از محل (جزء محیطی) و ۳. ارتباط بین کیفیت خاک و سلامت گیاه، حیوان و انسان (مؤلفه سلامت) معرفی شد (۳).

در مطالعات تعیین کیفیت خاک، محققان متعددی مجموعه‌ای از معیارهای کیفیت خاک را پیشنهاد داده‌اند و کیفیت خاک را بر اساس روش معیاری مجموعه کل داده‌ها (TDS: Total Data Set) ارزیابی کرده‌اند؛ اما از آنجایی که اندازه‌گیری تمام خصوصیات خاک برای ارزیابی کیفیت خاک مقرون‌به‌صرفه نیست و از سوی دیگر، زمانی که تعداد زیادی متغیر اندازه‌گیری می‌شود، برخی مشکلات علمی به وجود می‌آید و تعداد روابط نیز بیش از حد تصور خواهد بود (۴۲). بنابراین می‌توان از روش‌های انتخاب معیار جایگزین مثل مجموعه حداقل داده‌های مورد نیاز (MDS: Minimum Data Set) بر اساس نظر کارشناسان و یا با استفاده از روش‌های ریاضی یا آماری مانند تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA: Principal Component Analysis) استفاده کرد که انتخاب این روش می‌تواند در تفسیر کیفیت پویای خاک و پس از آن، مدیریت پایدار اراضی با کمترین هزینه و حداقل زمان مؤثر باشد (۲).

شاخص‌های کمی کیفیت خاک تجمعی ساده (IQI<sub>A</sub>: Simple additive integrated quality index)، کیفیت خاک تجمعی وزنی (IQI<sub>w</sub>: Weighted additive integrated quality index) و شاخص کیفیت خاک نمرور (NQI: Nemer Quality Index) از پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده پژوهشگران در سراسر جهان برای ارزیابی کیفیت خاک هستند (۲۳ و ۴۳). در ارزیابی کیفیت خاک در منطقه شرق تهران، دو پارامتر کربن آلی و سدیم به‌عنوان مجموعه حداقل انتخاب و گزارش شد که شاخص کیفیت خاک در کاربری‌های کشاورزی، پارک و فضای سبز شهری و اراضی بایر اختلاف معناداری دارد و کمترین کیفیت خاک مربوط به اراضی بایر است (۲۹). در پژوهشی، شاخص‌های کیفیت خاک IQI و NQI با استفاده از ویژگی‌های خاک در دو مجموعه کل و کمترین داده در اراضی کشاورزی اسپانیا محاسبه و گزارش شد که شاخص IQI در مقایسه با شاخص NQI کیفیت خاک را بهتر تخمین می‌زند و روش IQI-MDS، ارزیابی مناسبی از کیفیت خاک ارائه کرده است (۳۷). در پژوهشی دیگر، شاخص کیفیت خاک IQI بر اساس مجموعه MDS و روش‌های نمره‌دهی خطی و غیرخطی در سی دشت استان گیلان تعیین شد.

## مواد و روش

### منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه بین  $45^{\circ} 05'$  تا  $45^{\circ} 18'$  طول شرقی و  $37^{\circ} 15'$  تا  $37^{\circ} 33'$  عرض شمالی و با وسعت  $32549/31$  هکتار در جنوب دشت ارومیه در استان آذربایجان غربی قرار دارد (شکل ۱). کاربری اصلی اراضی این منطقه، باغی به خصوص باغ سیب است. این منطقه از تنوع چشمگیری از خاک، شکل زمین، شرایط زهکشی و فعالیت انسانی برخوردار است. بر اساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک شهرستان ارومیه در بازه زمانی سال ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۷، این منطقه با میانگین بارندگی  $330$  میلی‌متر و میانگین دمای  $12/3$  درجه سلسیوس دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است و رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب زیریک و مزیک است. علاوه بر آب‌های زیرزمینی، منابع آبیاری منطقه شامل رودخانه باراندوزچای و شهرچای است که از غرب به شرق جریان دارند و توسط کانال‌ها و نهرهایی سنتی وارد اراضی زراعی می‌شوند. اکثر خاک‌های این منطقه به طور طبیعی تحت تأثیر شکل اراضی مختلفی تشکیل شدند که از لحاظ ارتفاع، توپوگرافی، زهکشی و تیپ خاک متفاوت هستند و این اشکال زمین نیز می‌تواند عکس‌العمل این اراضی را به خواص کیفی تحت تأثیر قرار دهند. تأثیر مجموعه این عوامل انسانی و طبیعی و عدم توجه به آن‌ها، می‌تواند خاک‌های این منطقه را که از نظر زیست‌محیطی، اکولوژیکی، کشاورزی، اقتصادی و حیات انسانی بسیار حائز اهمیت است، در معرض تهدید و تخریب قرار دهد.

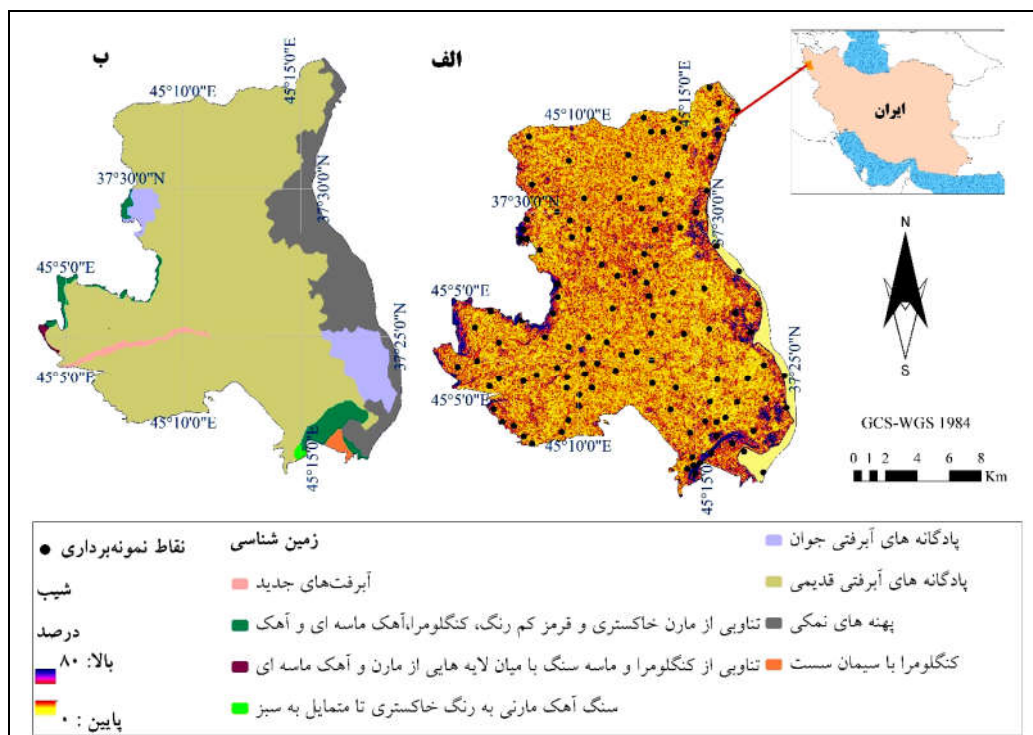
### روش پژوهش

مراحل کلی انجام این پژوهش شامل (۱) جمع‌آوری داده‌های خاک از طریق نمونه‌برداری، (۲) مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها، (۳) انتخاب مجموعه داده‌ها و تعیین حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، (۴) امتیازدهی و وزن دهی به ویژگی‌ها، (۵) محاسبه شاخص کیفیت خاک، (۶) بررسی خودهمبستگی فضایی کیفیت

نتایج نشان داد، شاخص کیفیت خاک به روش نمره‌دهی غیرخطی نسبت به روش نمره‌دهی خطی، تفاوت کلاس کیفیت خاک بین کاربری‌های مختلف را بهتر نشان می‌دهد (۳۶).

داده‌هایی که در مطالعات محیطی بررسی می‌شوند، در اکثر مواقع مستقل از یکدیگر نیستند؛ وابستگی این داده‌ها با یکدیگر به علت موقعیت و مکان قرارگرفتن مشاهدات در فضای مورد مطالعه است؛ این مشاهدات داده‌های فضایی نام دارند. به دلیل وجود همبستگی فضایی بین داده‌ها، روش‌های معمول آماری روش مناسبی برای بررسی این داده‌ها نیستند و می‌توان از آمار فضایی به عنوان گزینه‌ای مناسب برای تحلیل این داده‌ها استفاده کرد. تحلیل فضایی کیفیت خاک اطلاعات مفیدی را برای شناسایی نقاط داغ و بحرانی فراهم کرده است و از این طریق می‌توان هنگام برنامه‌ریزی و تدوین سیاست‌های پیشگیری، مقابله و کنترل، نقاط بحرانی را شناسایی، هدف‌گذاری و در اولویت کارهای اجرایی قرار داد. آماره خودهمبستگی موران جهانی و تحلیل لکه‌های داغ و سرد، از جمله مدل‌هایی هستند که در مطالعات متعددی برای تحلیل فضایی دمای سطح زمین ( $10$  و  $18$ )، تحلیل فضایی عناصر سنگین خاک ( $8$  و  $19$ )، تحلیل فضایی خصوصیات خاک ( $20$  و  $32$ ) به کار برده شده است.

تولیدات کشاورزی از نمادهای مهم استان آذربایجان غربی است و دشت ارومیه به خصوص بخش‌های جنوبی آن از مناطق عمده تولیدی محسوب می‌شود و حیات اقتصادی بسیاری از مردم این منطقه به آن وابسته است. طی چند دهه گذشته، سطح زیر کشت و عملکرد (تولید در واحد سطح) این محصولات بدون در نظر گرفتن استراتژی‌های مدیریتی حفظ و نگهداری سلامت خاک به شدت افزایش یافته است. این رویکردها همراه با سامانه‌های آبیاری غرقایی و گاهی آبیاری با فاضلاب و مصرف مداوم کود، سم و ادوات کشاورزی می‌تواند در درازمدت کیفیت خاک را تهدید کند (۳۳). این پژوهش با هدف تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در دشت ارومیه و بررسی خودهمبستگی فضایی داده‌های کیفیت خاک انجام شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی، (الف) درصد شیب و (ب) زمین شناسی

فراهم می کند. نمونه های خاک پس از هوا خشک و عبور از الک ۲ میلی متری، برای آزمایش های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند.

### مطالعات آزمایشگاهی

نمونه های خاک تحت آزمایش های فیزیکی و شیمیایی شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (۱۳)، پ هاش در گل اشباع (۲۴)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (۲۴)، کربن آلی به روش والکی - بلاک (۴۱)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید (۳۱)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم نرمال (۴۰)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم (۳۱)، فسفر قابل جذب به وسیله عصاره گیری با بیکربنات سدیم (۳۰)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۷) و عناصر کم مصرف با استفاده از عصاره گیری با DTPA (۳۰) تعیین شدند. ترکیب یونی خاک در عصاره اشباع خاک تعیین شد و سپس با استفاده از غلظت کلسیم، منیزیم و سدیم محلول، شاخص های نسبت جذب سدیم و درصد سدیم تبادلی خاک (۴۰) در نمونه های خاک اندازه گیری شدند. لازم به ذکر است

خاک با استفاده از آماره موران جهانی و (۷) شناسایی نقاط داغ و سرد کیفیت خاک از طریق آماره گتیس - ارد جی انجام شد که هر یک از این مراحل در ادامه شرح داده شده است.

### نمونه برداری از خاک منطقه مطالعاتی

در این پژوهش با توجه به مطالعات خاک شناسی نیمه تفصیلی دشت ارومیه (۳۳)، تعداد ۲۴ پروفیل از واحد مختلف خاک این منطقه که بیشتر تحت کاربری باغ و زراعی هستند، حفر و تشریح شد و سپس مورد نمونه برداری قرار گرفت و ۱۲۰ نمونه نیز از سولوم خاک برداشت شد. در واقع برای هر واحد خاک، یک خاکرخ خاک تشریح و مورد نمونه برداری قرار گرفت. سپس در هر واحد خاک و در جهت شمال، جنوب، غرب و شرق در محدوده خاک فعال یا منطقه گسترش ریشه های درختی (محدوده صفر تا ۶۰ سانتی متری)، به وسیله مته نمونه های دیگری به صورت تصادفی برداشت شد. چنین عملیاتی علاوه بر افزایش تعداد نمونه های خاک محدوده هر پروفیل و تیپ خاک، امکان مقایسه های آماری شاخص کیفیت را بین تیپ های مختلف خاک

صورت گرفت. در روش خطی مشخصه‌های مربوط به داده‌ها در سه گروه الف) بیشتر بهتر است، برای ویژگی‌هایی از خاک به کار می‌رود که افزایش آن باعث بهبود کیفیت خاک شود ب) کمتر بهتر است، برای ویژگی‌هایی از خاک که افزایش آن باعث کاهش کیفیت خاک شود و ج) محدوده مطلوب برای ویژگی‌هایی از خاک که افزایش یا کاهش آن تا حد معینی باعث بهبود کیفیت خاک می‌شود و افزایش یا کاهش آن بیش از حد بهینه، موجب کاهش کیفیت خاک شود، امتیازبندی شدند (۲). امتیازدهی برای تابع بیشتر بهتر از فرمول ۱ و تابع کمتر بهتر از فرمول ۲ انجام شد (۴). برای تابع امتیازدهی بهینه، یک محدوده بهینه برای آن ویژگی خاک تعریف شد و سپس با استفاده از توابع بیشتر بهتر و کمتر بهتر بسته به این که مقدار ویژگی اندازه‌گیری شده پایین‌تر یا بالاتر از حد بهینه بود، امتیازدهی ویژگی‌ها صورت گرفت. اگر مقدار ویژگی خاک معادل یا محدوده بهینه بود، امتیاز آن ویژگی برابر یک در نظر گرفته شد (۳۴). برای امتیازدهی غیرخطی ویژگی‌ها، تابع سیگموئیدی مطابق فرمول ۳ مورد استفاده قرار گرفت (۲۲).

$$S_L = (x - t) / (h - t) \quad (1)$$

$$S_L = 1 - ((x - t) / (h - t)) \quad (2)$$

که در آن‌ها  $S_L$  امتیاز خطی است که مقدار آن بین صفر تا یک است،  $x$  مقدار اندازه‌گیری شده ویژگی خاک،  $t$  حداقل مقدار و  $h$  بیشترین مقدار ویژگی خاک است.

$$S_{NL} = a / (1 + (x / x_0)^b) \quad (3)$$

که در آن  $S_{NL}$  امتیاز غیرخطی هر ویژگی خاک است که مقدار آن بین صفر تا یک است،  $a$  بیشترین امتیاز است که در این پژوهش برابر یک در نظر گرفته شد،  $x$  مقدار اندازه‌گیری شده ویژگی خاک،  $x_0$  میانگین هر ویژگی و  $b$  شیب معادله است که برای تابع بیشتر بهتر برابر  $2/5$  - و برای تابع کمتر بهتر برابر  $2/5$  + در نظر گرفته شد.

در مرحله بعد، وزن متغیرها از طریق تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه عاملی محاسبه شد. در روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی، وزن هر متغیر برابر با درصد واریانس در هر مؤلفه

که باتوجه به اینکه منطقه مورد مطالعه دارای کاربری باغ و به خصوص باغ سیب برای مدت زمان به نسبت زیاد بوده است، بنابراین تحت تأثیر مصرف انواع سموم و کودهای کشاورزی بوده و همچنین منابع آب آبیاری اغلب رودخانه بوده است که گاهی فاضلاب به این رودخانه‌ها ریخته می‌شود و به احتمال باعث آلودگی این منابع به فلزات سنگین می‌شود؛ بنابراین در این مطالعه شکل‌های کل عناصر نیکل، روی، مس، منگنز، کامیوم و سرب به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (۹) عصاره‌گیری شد و غلظت آن‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

### انتخاب مجموعه داده‌ها و محاسبه شاخص کیفیت خاک

در این پژوهش برای بررسی کیفیت خاک از شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی (IQIw) استفاده شد. برای محاسبه این شاخص، ابتدا نیاز به تعیین مجموعه داده‌ها بود. در این مرحله تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک به عنوان مجموعه کل داده (TDS) در نظر گرفته شد و مجموعه دوم نیز شامل مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، مجموعه حداقل داده (MDS) نامیده شد (۳۴). برای به دست آوردن مجموعه MDS از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد (۱۲). به این صورت که داده در چندین مؤلفه (PC) دسته‌بندی شده و فقط مؤلفه‌هایی که ارزش ویژه بیشتر از یک داشتند، انتخاب شدند (۱۱). در هر یک از مؤلفه‌ها ویژگی‌هایی که دارای کمتر از ۱۰ درصد اختلاف با بیشترین مقدار وزن موجود در هر ویژگی بود، برای دسته حداقل داده‌ها انتخاب شدند.

### امتیازدهی و وزن‌دهی به متغیرها و محاسبه شاخص کیفیت خاک

باتوجه به اینکه ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای گوناگونی بودند، به منظور اینکه بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی در آورد، باید بی واحد شوند، در این پژوهش، نمره‌دهی (امتیازدهی) به هر یک از داده‌های تعیین شده با استفاده از توابع امتیازدهی استاندارد (SSF: Standard Scoring Function) خطی و غیرخطی

آن  $(x_i - \bar{x})$ ،  $W_{ij}$  وزن موجود بین عارضه  $i$  و  $j$ ،  $n$  تعداد کل عوارض جغرافیایی موجود در لایه مورد استفاده است. همچنین  $S_0$ ، جمع کل وزن‌های فضایی و  $Z_i$ ، نمره استاندارد هستند که به ترتیب از فرمول ۶ و ۷ محاسبه شد.

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} \quad (6)$$

$$Z_i = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad , \quad E_I = -\frac{1}{n-1} \quad V[I] = E[I]^2 - E[I]^2 \quad (7)$$

### تحلیل لکه‌های داغ (Hot Spot Analysis)

بعد از شناسایی الگوی فضایی حاکم بر داده‌های کیفیت خاک، به منظور شناسایی لکه‌های داغ و لکه‌های سرد از آماره گنیس - ارد جی (Getis-Ord  $G_i^*$ ) استفاده شد. این آماره در حقیقت به هر عارضه در چهارچوب عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند، نگاه می‌کند. اگر عارضه‌ای مقادیر زیادی داشته باشد جالب و مهم است، ولی ممکن است یک لکه داغ معنی‌دار از نظر آماری نباشد. برای اینکه یک عارضه لکه داغ تلقی شود و از نظر آماری معنی‌دار نیز باشد، باید هم خودش و هم عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند دارای مقادیر زیاد باشند. در این تحلیل، جمع محلی یک عارضه و همسایگانش به طور نسبی با جمع کل عارضه‌ها مقایسه می‌شود و امتیاز  $Z$ -Score برای خروجی نهایی زمانی به دست خواهد آمد که جمع محلی به طور زیاد و غیرمنتظره‌ای از جمع محلی مورد انتظار بیشتر باشد و اختلاف به‌اندازه‌ای باشد که نتوان آن را در نتیجه تصادف دانست. برای امتیاز  $Z$ -Score مثبت و معنادار از نظر آماری، هرچه امتیاز  $Z$ -Score بزرگتر باشد، مقادیر زیاد به میزان فراوانی خوشه‌بندی شده و لکه داغ تشکیل می‌دهند. برای امتیاز  $Z$ -Score منفی و معنادار از نظر آماری، هرچه امتیاز  $Z$ -Score کوچکتر باشد، به معنای خوشه‌بندی شدیدتر مقادیر کم خواهد بود و این‌ها در حقیقت لکه‌های سرد را تشکیل می‌دهند (جدول ۱). آماره گنیس - ارد جی از فرمول ۸ محاسبه شد (۱۰).

است. مقدار وزن برای متغیرهای غیرهمبسته کامل و برای متغیرهایی که همبستگی دارند، تقسیم و مجموع وزن‌ها به عدد یک استاندارد شد (۳۵). در روش وزن‌دهی تجزیه عاملی، وزن هر ویژگی از نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، در دو مجموعه کل (TDS) و حداقل داده‌ها (MDS) محاسبه و در نهایت با شاخص IQI در دو مجموعه کل و کمترین داده‌ها از طریق فرمول ۴ تعیین شدند.

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

که در آن IQI شاخص کیفیت خاک،  $W_i$  وزن شاخص،  $S_i$  نمره خطی شاخص و  $n$  تعداد شاخص‌های تشکیل‌دهنده MDS و TDS است.

### آماره موران جهانی (Spatial Autocorrelation Morans I)

آماره موران جهانی به بررسی خودهمبستگی فضایی بر اساس مکان پراکنش دو مقدار می‌پردازد و خصیصه مدنظر از عارضه جغرافیایی را در آن مکان تحلیل می‌کند. برای محاسبه آماره موران، ابتدا نمره استاندارد  $Z$  و  $p$ -value محاسبه می‌شود و در مرحله بعدی به ارزیابی و معنادار بودن شاخص پرداخته می‌شود. اگر مقدار آماره موران جهانی بزرگتر از صفر باشد، داده‌ها نوعی خوشه‌بندی فضایی را نشان می‌دهند و اگر مقدار آماره موران جهانی کمتر از صفر باشد، عوارض مورد مطالعه دارای الگوی پراکنده هستند. در آماره موران جهانی فرض صفر بیان می‌کند که هیچ نوع خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر خصیصه مرتبط با عوارض جغرافیایی مدنظر وجود ندارد و اگر مقدار  $P$ -value بسیار کوچک و مقدار  $Z$  بسیار بزرگ باشد، فرض صفر رد می‌شود. آماره موران جهانی برای داده‌های کیفیت خاک از فرمول ۵ محاسبه شد (۱۴):

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{i,j} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (5)$$

در این رابطه،  $Z_i$  تفاضل بین مقدار خصیصه عارضه  $i$  با میانگین

جدول ۱. مقادیر Z-Score و P-value برای سطوح اطمینان مختلف

سطح اطمینان	سطح معنی داری (p-value)	z-score
۹۰٪	< ۰/۱۰	+۱/۶۵ یا > -۱/۶۵
۹۵٪	< ۰/۰۵	+۱/۹۶ یا > -۱/۹۶
۹۹٪	< ۰/۰۱	+۲/۵۸ یا > -۲/۵۸

آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. باتوجه به میانگین رس (۳۳/۰۳ درصد)، سیلت (۴۰/۲۲ درصد) و شن (۲۸/۰۷ درصد)، بیشتر نمونه‌ها دارای کلاس بافتی لوم رسی بودند. مقدار pH خاک‌های منطقه در محدوده ۷/۱۱-۱۱/۹۵ با میانگین ۷/۹ قرار داشت و میانگین کربن آلی در خاک‌ها برابر ۱/۱۲ درصد بود. علاوه بر این، محتویات نیتروژن خاک‌ها با مقدار میانگین ۰/۱۴ درصد کم بود. در بین متغیرهای مورد مطالعه، پ هاش (pH) کمترین ضریب تغییرات به میزان ۰/۰۸ درصد و شوری (EC) بیشترین ضریب تغییرات به میزان ۱/۵۴ درصد را داشت.

### شاخص کیفیت خاک

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (کل واریانس تبیین شده ویژگی‌های خاک با عوامل چرخش یافته) در نمونه‌های خاک در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق این جدول، شش مؤلفه اصلی دارای ارزش ویژه بزرگتر از یک هستند. این مؤلفه‌ها در مجموع بیش از ۷۹/۸۶ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه می‌کنند. در مؤلفه اول EC، نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم تبادل (ESP) و جرم مخصوص ظاهری خاک بیشترین ارزش را به خود اختصاص دادند که اختلاف آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بود. از آنجا که بیش از یک ویژگی در این مؤلفه انتخاب شد، همبستگی بین آن‌ها محاسبه و ویژگی که بیشترین ضریب همبستگی را داشت، در دسته حداقل داده‌ها قرار گرفت؛ بنابراین ویژگی نسبت جذب سدیم (SAR) به‌عنوان متغیر وابسته‌ی رابطه‌ای که علاوه بر معنی داری ( $P < 0.01$ ) دارای بیشترین ضریب همبستگی و بیشترین ضریب تعیین بود، انتخاب شد. در مؤلفه‌های دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم به ترتیب عناصر نیکل و کادمیوم خاک، ظرفیت

پس از محاسبه تحلیل لکه‌های داغ، نقشه‌های درونیابی بر اساس مقادیر Z-Score با استفاده از روش کریجینگ تهیه و سپس این نقشه‌ها بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۱ طبقه‌بندی شدند.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{i,j} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{i,j}}{S \times \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{i,j}^2 - \left( \sum_{j=1}^n W_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (8)$$

در این رابطه،  $X_j$  مقدار خصیصه عارضه  $j$ ،  $w_{ij}$  وزن فضایی موجود بین عارضه  $i$  و  $j$  و  $n$  تعداد کل عارضه‌ها می‌باشد و  $S$  پارامتری است که مطابق رابطه ۹ قابل محاسبه است:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n X_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} \quad (9)$$

## نتایج و بحث

### تشریح ویژگی‌های خاک

بر اساس بررسی‌های انجام شده، بارندگی کم و بیشتر بودن میزان تبخیر و تعرق پتانسیل نسبت به بارندگی موجب شده است، خاک‌های منطقه مطالعاتی توسعه و تکامل کمی داشته باشند و بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA، خاک‌های منطقه مطالعاتی در ۶ زیر گروه خاک از رده اینسپتی سولز (Inceptisols) قرار بگیرند (جدول ۲). بررسی مساحت زیرگروه‌های شناسایی شده نشان داد، زیرگروه Endoaquepts (FE) Fluventic بیشترین مساحت برابر ۱۰۶۴۰/۰۴ هکتار و معادل با ۳۲/۶۹٪ و زیرگروه Typic calcixerepts (TC)، کمترین مساحت برابر با ۲۱۸۴/۷ هکتار و معادل با ۶/۷۱٪ را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۲).

جدول ۲. زیرگروه سری‌های مورد مطالعه براساس سیستم آمریکایی (USDA)

ردیف	سری خاک	USDA	مساحت	
			هکتار	درصد
۱	هفتپستان	Typic Haploxerepts (TH1)	۲۶۸۸/۱۱	۸/۲۶
۲	ساراجوق	Fluventic Endoaquepts (FE)	۱۰۶۴۰/۰۴	۳۲/۶۹
۳	دربرود	Fluventic Endoaquepts (FE)		
۴	رشکان	Typic Calcixerepts (TC)	۲۱۸۴/۷	۶/۷۱
۵	کوکیا	Typic Calcixerepts (TC)		
۶	داش آغر	Typic Calcixerepts (TC)		
۷	بالانچ	Typic Calcixerepts (TC)		
۸	چوب تراش	Typic Endoaquepts (TE)	۲۷۷۱/۹۶	۸/۵۲
۹	قورت تپه	Typic Endoaquepts (TE)		
۱۰	آغچه زیوه	fluventic Haploxerepts (FH)	۸۳۸۳/۲۱	۲۵/۷۶
۱۱	دیدان	fluventic Haploxerepts (FH)		
۱۲	باراندوز	fluventic Haploxerepts (FH)		
۱۳	عربلو	Typic Halaquepts (TH2)	۵۸۷۹/۱۸	۱۸/۰۶
۱۴	جبل کندی	Typic Halaquepts (TH2)		
۱۵	اردوشاهی	Typic Halaquepts (TH2)		

جدول ۳. خصوصیات آماری ویژگی‌های خاک‌های مطالعاتی

ویژگی‌ها	حد	حد	حد	ویژگی‌ها	حد	حد	حد	حد	حد	انحراف معیار	ضریب تغییرات
شن (%)	۱۲	۴۶	۲۸/۰۷	۷/۸	۰/۲۷	جرم مخصوص ظاهری (g cm <sup>-1</sup> )	۱/۰۴	۱/۵۷	۱/۳۸	۰/۰۷	۰/۰۵
سیلت (%)	۲۸	۷۱/۵	۴۰/۲۲	۷/۶۴	۰/۱۹	تخلخل (%)	۰/۳۲	۰/۶۲	۰/۴۱	۰/۰۴	۰/۱
رس (%)	۲۰	۵۸	۳۳/۰۳	۶/۸۶	۰/۲	نیتروژن (mg kg <sup>-1</sup> )	۰/۰۵	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۴
آهک (%)	۱۴/۲	۳۳/۸	۲۰/۴۳	۳/۵۶	۰/۱۷	فسفر (mg kg <sup>-1</sup> )	۱/۳	۱۸/۵	۱۲/۳	۲/۱۲	۰/۱۷
آهک فعال (%)	۶/۵	۸۸/۱	۱۰/۸	۷/۴۸	۰/۶۹	پتاسیم (mg kg <sup>-1</sup> )	۱۵۵	۳۳۴/۵	۲۱۰/۶	۲۹/۷۷	۰/۱۴
پ هاش (ds m <sup>-1</sup> )	۷/۱۱	۱۱/۹۵	۷/۹۶	۰/۶۳	۰/۰۸	نیکل (mg kg <sup>-1</sup> )	۲۵/۴	۳۶/۴	۳۰/۹۵	۲/۵۱	۰/۰۸
ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol kg <sup>-1</sup> )	۱۵/۴	۳۶/۶	۲۲/۱۹	۳/۰۴	۰/۱۳	روی (mg kg <sup>-1</sup> )	۳۸/۲	۱۱۸	۶۵/۹۳	۱۹/۸۴	۰/۳
هدایت الکتریکی	۰/۶	۱۷/۱	۳/۲۲	۴/۹۹	۱/۵۴	مس (mg kg <sup>-1</sup> )	۱۴/۹۳	۲۶/۲	۲۱/۰۱	۲/۹۵	۰/۱۴
کربن آلی (%)	۰/۰۶۵	۱/۸۵	۱/۱۲	۰/۳۱	۰/۲۸	منگنز (mg kg <sup>-1</sup> )	۳۰/۴	۶۲۲	۴۸۲/۵۷	۶۳/۶۸	۰/۱۳
درصد سدیم تبدیلی	۵/۱	۳۸	۱۱/۶۴	۸/۲۶	۰/۷	کادمیوم (mg kg <sup>-1</sup> )	۰/۵۴	۱/۶	۱/۱۷	۰/۲۱	۰/۱۸
نسبت جذب سدیم	۳/۵	۳۲/۲	۹/۶۹	۷/۰۸	۰/۷۳	سرب (mg kg <sup>-1</sup> )	۲۶/۶۲	۳۸	۳۲/۲۹	۲/۷۷	۰/۰۸



جدول ۴. نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی

مؤلفه یک	مؤلفه دو	مؤلفه سه	مؤلفه چهار	مؤلفه پنج	مؤلفه شش	
۶/۴	۳/۶	۲/۸	۱/۷	۱/۶	۱/۳	ارزش ویژه
۲۹/۰۶	۱۶/۵۹	۱۲/۷۱	۷/۹۵	۷/۶۵	۵/۸۹	درصد واریانس
۲۹/۰۶	۴۵/۶۶	۵۸/۳۷	۶۶/۳۲	۷۳/۹۷	۷۹/۸۶	درصد تجمعی واریانس
-----						
خصوصیات						
۰/۲۲۲	-۰/۱۷۶	۰/۷۸۴	۰/۲۰۳	-۰/۰۱۶	-۰/۳۵۴	رس
-۰/۰۶۹	-۰/۰۰۹	-۰/۴۱۳	-۰/۷۸۷	۰/۱۰۳	۰/۳۲۸	شن
-۰/۲۳۵	۰/۱۰۲	۰/۱۴۷	۰/۷۶۵	-۰/۰۹۷	-۰/۰۳۰	سیلت
۰/۶۱۷	۰/۱۳۰	۰/۰۸۲	-۰/۱۷۷	-۰/۰۹۲	۰/۳۲۳	پ هاش
۰/۸۹۳	۰/۰۴۴	۰/۱۰۰	-۰/۱۳۲	۰/۰۵۸	-۰/۰۸۶	هدایت الکتریکی
۰/۹۴۱	-۰/۱۴۱	۰/۱۲۶	-۰/۰۳۹	۰/۰۷۲	-۰/۱۰۸	نسبت جذب سدیم
۰/۹۳۷	-۰/۱۴۲	۰/۰۸۴	-۰/۰۳۱	۰/۰۵۲	-۰/۰۸۵	درصد سدیم تبادل
۰/۰۵۱	۰/۰۱۹	۰/۸۷۱	۰/۱۷۴	-۰/۲۱۴	۰/۰۸۴	ظرفیت تبادل کاتیونی
-۰/۵۴۷	-۰/۰۶۵	۰/۳۶۹	-۰/۱۱۸	۰/۱۳۰	۰/۵۰۸	کربن آلی
-۰/۶۵۱	۰/۱۰۱	۰/۳۱۸	-۰/۱۷۰	۰/۳۳۲	۰/۳۲۶	نیتروژن
-۰/۳۲۱	-۰/۱۰۵	-۰/۲۳۴	-۰/۰۱۴	۰/۰۹۱	۰/۷۹۸	فسفر
۰/۱۶۹	-۰/۰۲۸	۰/۲۲۱	۰/۰۳۱	۰/۸۵۳	-۰/۰۰۹	آهک
-۰/۱۲۱	۰/۰۷۷	-۰/۰۵۷	-۰/۰۱۱	۰/۹۳۸	۰/۱۲۶	آهک فعال
-۰/۵۲۹	۰/۰۶۱	-۰/۱۸۴	۰/۱۷۲	-۰/۴۷۰	۰/۳۷۸	پتاسیم
۰/۹۰۹	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	-۰/۰۱۸	۰/۱۸۲	-۰/۱۹۸	جرم مخصوص ظاهری
-۰/۷۷۸	۰/۰۵۳	۰/۱۱۰	-۰/۰۳۲	۰/۲۷۸	۰/۲۰۳	تخلخل
۰/۰۳۱	۰/۸۴۵	۰/۰۲۲	۰/۲۹۵	۰/۰۷۳	-۰/۰۰۳	نیکل
-۰/۰۳۲	۰/۶۷۰	-۰/۳۵۱	۰/۳۴۷	۰/۱۶۳	۰/۰۲۶	روی
۰/۵۱۶	۰/۳۷۳	۰/۲۲۰	۰/۴۷۶	-۰/۱۲۸	۰/۳۱۰	مس
-۰/۰۶۰	۰/۳۶۰	۰/۲۶۳	۰/۷۷۲	۰/۱۳۶	۰/۱۴۷	منگنز
-۰/۱۳۵	۰/۸۳۴	-۰/۰۶۴	۰/۰۲۹	-۰/۰۴۲	-۰/۰۶۱	کادمیوم
-۰/۰۶۲	۰/۶۴۸	۰/۵۱۸	-۰/۱۷۸	-۰/۰۹۷	-۰/۰۵۳	سرب

ویژگی‌های شن، فسفر قابل استفاده، چگالی ظاهری، تخلخل، نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم به‌عنوان حداقل داده انتخاب شد (۲۶). در ارزیابی شاخص کیفیت خاک دشت نیشابور، پنج ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده و نیتروژن کل به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک معرفی شد (۲۳).

تبادل کاتیونی (CEC)، درصد شن، سیلت و منگنز، آهک و آهک فعال و فسفر به دلیل داشتن بیشترین ارزش ویژه انتخاب شدند. در نهایت شش معیار نسبت جذب سدیم، نیکل، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد شن، درصد فسفر و درصد آهک فعال به‌عنوان ویژگی‌های MDS انتخاب شدند. در بررسی شاخص کیفیت خاک در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز،

با استفاده از روابط موجود برای نقاط نمونه برداری در دو مجموعه TDS و MSD در جدول ۸ ارائه شده است. کیفیت خاک در نقاط نمونه برداری شده بر اساس میانگین  $IQITDS$  و  $IQIMDS$  در حالت خطی، به ترتیب با مقادیر ۰/۵۷ در درجه II و ۰/۶۵ در درجه III و بر اساس میانگین  $IQITDS$  و  $IQIMDS$  در حالت غیرخطی، به ترتیب با مقادیر ۰/۵۱ و ۰/۴۹ در درجه II قرار گرفت. بیشترین مقدار شاخص کیفیت خاک در حالت  $IQIMDS$  خطی و کمترین مقدار در حالت  $IQIMDS$  غیرخطی حاصل شد (جدول ۸).

بررسی همبستگی خطی و غیرخطی بین شاخص کیفیت خاک با دسته کل و حداقل داده‌ها نشان داد، حالت غیرخطی شاخص IQI ضریب همبستگی بیشتری نسبت به حالت خطی شاخص IQI دارد (شکل ۲). باتوجه به این که در این مدل برای هر پارامتر ضریب وزنی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین دقت مناسب‌تری در ارزیابی شاخص کیفیت خاک دارد (۳۱). ضریب تبیین بین دو مجموعه TDS و MDS در حالت خطی ۰/۷۳ و در حالت غیرخطی ۰/۸۵ درصد بود. این ضرایب نشان می‌دهد، با اطمینان ۰/۷۳ در حالت خطی و ۰/۸۵ در حالت غیرخطی، می‌توان از مجموعه MDS به جای TDS در حالت غیرخطی استفاده کرد. در پژوهشی همبستگی بین  $IQITDS$  و  $IQIMDS$  به میزان  $R^2=0/83$  گزارش شد (۱۵). در مطالعه‌ای همبستگی مثبت به میزان  $R^2=0/87$  بین دو روش TDS و MDS وجود داشت (۳۹). در پژوهشی دیگر، ضریب  $R^2$  بین  $IQI-MDS$  و  $IQI$  برابر با ۰/۸۳ گزارش و بیان شد که تعداد کمتری از ویژگی‌های خاک که به دقت انتخاب شده باشد، می‌تواند به طور مناسب اطلاعات مورد نیاز برای تصمیم‌گیری را فراهم کنند (۳۸). بنابراین استفاده از مجموعه MDS برای مطالعه کیفیت پیشنهاد می‌شود، زیرا این روش از داده‌های کمتری استفاده کرده و موجب صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه در انجام مطالعات می‌شود و همچنین نتایجی مشابه روش TDS نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای ضریب تبیین بین مجموعه

در پژوهشی، درصد سیلت، واکنش خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، مواد آلی و فسفر در دسترس به‌عنوان مجموعه حداقل برای برآورد شاخص کیفیت خاک در موقعیت‌های مختلف زمین نما در اکوسیستم کشاورزی منطقه‌ای در اتیوپی تعیین شد (۲۵). در پژوهشی دیگر، کربن آلی خاک، پتاسیم قابل دسترس، روی، منیزیم، پتاسیم کل و رس به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در منطقه‌ای در چین معرفی شد (۲۱). بنابراین در مناطق با شرایط اقلیمی و مدیریتی گوناگون، حداقل مجموعه داده‌ها می‌تواند متفاوت باشد.

روابط همبستگی بین ویژگی‌های خاک در جدول ۵ ارائه شده است. باتوجه به نتایج، از بین ۴۸۴ جفت مقایسه، تعداد ۲۱۲ مقایسه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار هستند که این مسئله احتمال کاهش داده‌ها برای انجام تجزیه مؤلفه اصلی را در جلوگیری از همبستگی‌های موازی بین داده‌ها توجیه می‌نماید. در این جدول همبستگی بالایی بین کربن آلی با غلظت برخی عناصر همانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم وجود دارد و این نشان می‌دهد، مقادیر این عناصر می‌تواند به‌وسیله ماده آلی کنترل شود.

مقادیر سهم هر ویژگی حاصل از تجزیه عاملی در مجموعه TDS و MDS در جدول ۶ ارائه شده است. میزان تأثیرگذاری هر ویژگی در مدل‌های کیفیت خاک به وزن اختصاص یافته به آن ویژگی بستگی دارد. به عبارت دیگر، ویژگی‌های دارای وزن بیشتر در مجموعه TDS و MDS، دارای تأثیر بیشتر بر مدل کیفیت خاک بوده و با کاهش وزن آن، این تأثیر کمتر می‌شود (۱۱). نتایج حاصل از محاسبه وزن ویژگی‌ها در مجموعه TDS نشان داد، ویژگی‌های نسبت جذب سدیم، درصد شن و آهک فعال دارای وزن بیشتری بودند، درحالی‌که پ هاش دارای کمترین تأثیر در کیفیت خاک منطقه مورد مطالعه بود. در مجموعه MDS نیز نسبت جذب سدیم و نیکل دارای وزن بیشتری بود (جدول ۶).

درجه‌بندی کلاس‌های کیفیت خاک در مجموعه TDS و MDS در جدول ۷ و پارامترهای آماری شاخص کیفیت خاک

جدول ۵. ضریب همبستگی ویژگی‌های خاک

شماره	سیت	رس	آهک	جرم مخصوص ظاهری	تخلخل	کربن آلی	آهک فعال	درصد سديم تبادل	نسبت جذب سديم	ظرفيت تبادل کاتیونی	هدايت الکتریکی
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
سیت	۰/۵۴**										
رس	۰/۶۱**	۱									
آهک	۰/۱۶	۰/۰۸	۱								
جرم مخصوص ظاهری	۰/۱۲	۰/۳۳**	۰/۳۳**	۱							
تخلخل	۰/۰۸	۰/۲۱*	۰/۰۳	۰/۲**	۱						
کربن آلی	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۵۱**	۰/۵۳**	۱					
آهک فعال	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۵۵**	۰/۳۷**	۰/۱۶	۰/۰۷	۱				
درصد سديم تبادل	۰/۰۹	۰/۲۹*	۰/۱۸*	۰/۸۶**	۰/۵۱**	۰/۰۷	۰/۰۷	۱			
نسبت جذب سديم	۰/۱۱	۰/۳۳**	۰/۱۸*	۰/۸۶**	۰/۷۱**	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۹۹**	۱		
ظرفيت تبادل کاتیونی	۰/۴۶**	۰/۶۵**	۰/۳۴**	۰/۸۶**	۰/۲۵**	۰/۲۴**	۰/۲۴**	۰/۱۳	۰/۸۴**	۱	
هدايت الکتریکی	۰/۰۲	۰/۲۸**	۰/۱۳	۰/۱۶**	۰/۳۳**	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۸۴**	۰/۴۵**	۰/۵۷**	۱
پ هاش	۰/۱	۰/۱۹*	۰/۰۶	۰/۴۸**	۰/۳**	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۴۵**	۰/۴۸**	۰/۵۷**	۰/۱۷
نیترژن	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۶۵**	۰/۴**	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۵۷**	۰/۵۹**	۰/۳۸**	۰/۳۹**
فسفر	۰/۳۸**	۰/۰۱	۰/۵۸	۰/۴۶**	۰/۳۶**	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۳۳**	۰/۳۸**	۰/۳*	۰/۲*
پتاسیم	۰/۰۳	۰/۲۱*	۰/۳۱**	۰/۵۹**	۰/۲۶**	۰/۲۹**	۰/۲۹**	۰/۵۷**	۰/۶۰**	۰/۱۵	۰/۰۵
مس	۰/۴۸**	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۳۶**	۰/۲**	۰/۱۹*	۰/۱۱	۰/۳۸**	۰/۳۸**	۰/۱۵	۰/۱۸*
روی	۰/۱۲	۰/۳۸**	۰/۲۴**	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۳
منگنز	۰/۰۶**	۰/۴۷**	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۹*	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۳
نیکل	۰/۲۳*	۰/۲۵**	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۷
کادمیوم	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۱۹*	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۴**	۰/۲۳**	۰/۲۳**	۰/۰۲
سرب	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۱۹*	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۸*	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۳۵**
هدايت الکتریکی											
پ هاش	۰/۴۸**	۱									
نیترژن	۰/۶۴**	۰/۱۷	۱								
فسفر	۰/۳۷**	۰/۱۲	۰/۳**	۱							
پتاسیم	۰/۵۷**	۰/۲۲*	۰/۵۶**	۰/۴۴**	۱						
مس	۰/۳۴**	۰/۲۹**	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۰۹	۱					
روی	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۳**	۱				
منگنز	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۳۷**	۰/۳۷**	۱			
نیکل	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۴**	۰/۶۲**	۰/۵۱**	۰/۵۱**	۱		
کادمیوم	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۴۵**	۰/۳۵**	۰/۳۵**	۰/۶۲**	۱	
سرب	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۰/۰۲۸**	۰/۰۰۸	۰/۰۲۲**	۰/۱۹*	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴۵**	۰/۳۹**	۱

جدول ۶. جدول اشتراک ویژگی‌های مورد بررسی با عامل مستخرج (واریانس مشترک) به همراه ضریب وزنی

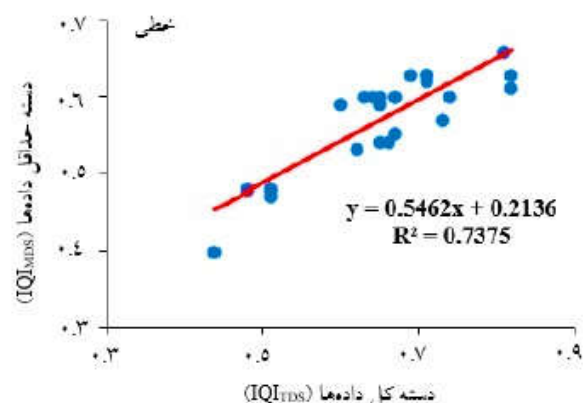
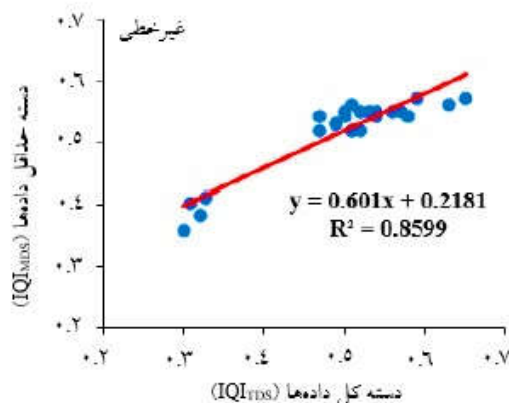
ویژگی‌های خاک	MDS		TDS	
	واریانس مشترک	وزن	واریانس مشترک	وزن
رس	—	—	۰/۸۶	۰/۰۴۹
شن	۰/۷۰	۰/۱۶	۰/۹۱	۰/۰۵۲
سیلت	—	—	۰/۶۸	۰/۰۳۹
پ هاش	—	—	۰/۵۴	۰/۰۳۱
هدایت الکتریکی	—	—	۰/۸۳	۰/۰۴۷
نسبت جذب سدیم	۰/۸۰	۰/۱۸	۰/۹۳	۰/۰۵۳
درصد سدیم تبادلی	—	—	۰/۹۱	۰/۰۵۲
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۶	۰/۱۴	۰/۸۴	۰/۰۴۸
کربن آلی	—	—	۰/۷۲	۰/۰۴۱
نیتروژن	—	—	۰/۷۸	۰/۰۴۴
فسفر	۰/۶۶	۰/۱۵	۰/۸۱	۰/۰۴۶
آهک	—	—	۰/۸۰	۰/۰۴۵
آهک فعال	۰/۷۰	۰/۱۶	۰/۹۱	۰/۰۵۲
پتاسیم	—	—	۰/۷۱	۰/۰۴۰
جرم مخصوص ظاهری	—	—	۰/۹۰	۰/۰۵۱
تخلخل	—	—	۰/۷۴	۰/۰۴۲
نیکل	۰/۷۷	۰/۱۸	۰/۸۰	۰/۰۴۶
روی	—	—	۰/۷۲	۰/۰۴۱
مس	—	—	۰/۷۹	۰/۰۴۵
منگنز	—	—	۰/۸۳	۰/۰۴۸
کادمیوم	—	—	۰/۷۲	۰/۰۴۱
سرب	—	—	۰/۷۳	۰/۰۴۲

جدول ۷. درجه‌بندی کلاس‌های کیفیت خاک براساس مدل IQI در مجموعه MDS و TDS

درجه کیفیت خاک					روش	امتیازدهی
V	IV	III	II	I		
$\leq 0/39$	$0/0-39/48$	$0/0-48/57$	$0/0-57/66$	$\geq 0/66$	TDS	خطی
$\leq 0/42$	$0/0-42/55$	$0/0-55/68$	$0/0-68/80$	$\geq 0/80$	MDS	
$\leq 0/36$	$0/0-36/43$	$0/0-43/50$	$0/0-50/57$	$\geq 0/57$	TDS	غیر خطی
$\leq 0/29$	$0/0-29/39$	$0/0-39/49$	$0/0-49/59$	$\geq 0/59$	MDS	

جدول ۸. پارامترهای آماری مقادیر محاسبه شده شاخص‌های کیفیت خاک در مدل IQI در دو مجموعه MDS و TDS

IQI <sub>MDS</sub>		IQI <sub>TDS</sub>		پارامترهای آماری
غیر خطی		خطی		
۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۶۵	۰/۵۷	میانگین
۰/۰۹۴	۸۰/۰۶	۰/۰۹۹	۰/۰۶	انحراف معیار
۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	واریانس
۰/۴۴	۱/۷۵	۰/۲	۱/۱	کشیدگی
-۰/۹۲	-۱/۷۴	-۰/۴۵	-۱/۱	چولگی
۰/۳	۰/۳۶	۰/۴۴	۰/۴۰	حداقل
۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۶۶	حداکثر



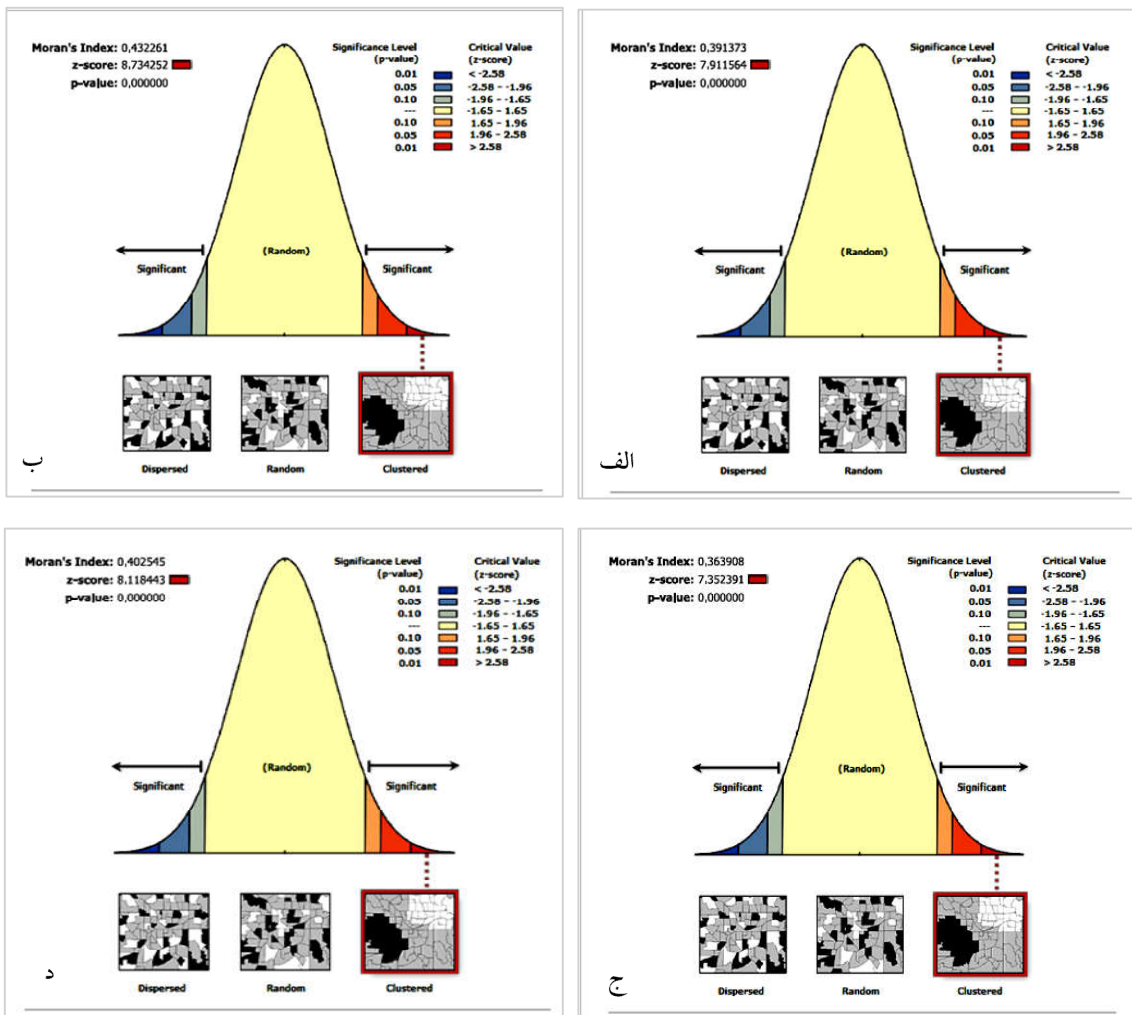
شکل ۲. رابطه‌های خطی IQI<sub>MDSL</sub>-IQI<sub>TDSL</sub> و رابطه‌های غیرخطی IQI<sub>MDSNL</sub>-IQI<sub>TDSNL</sub>

باتوجه به اینکه مقدار شاخص موران جهانی نزدیک به مثبت یک به دست آمده است و مقدار p-value بسیار کوچک و مقدار z بسیار بزرگ حاصل شد (شکل ۳)؛ بنابراین فرض صفر مبنی بر نبود هیچ نوع خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر داده‌های کیفیت خاک رد می‌شود و داده‌های کیفیت خاک دارای خودهمبستگی فضایی در سطح اطمینان ۹۹ درصد (p-value=0.01) هستند و به صورت خوشه‌ای در فضا توزیع یافته‌اند و مستقل از یکدیگر نیستند، یعنی مقادیر بالا و پایین داده‌های کیفیت خاک تمایل به خوشه‌ای شدن در فضا دارند. در بررسی توزیع فضایی خصوصیات خاک گزارش شد، همبستگی فضایی معناداری برای توزیع اندازه ذرات خاک (شن، سیلت، رس) وجود دارد، اما همبستگی فضایی برای شوری خاک معنادار نشده است (۲۰).

حداقل و کل داده‌ها، ۰/۹۷ گزارش شد. نتایج نشان داد، می‌توان به جای اندازه‌گیری کل خصوصیات اندازه‌گیری شده از دسته داده‌های حداقل استفاده کرد و با ضریب اطمینان زیاد به همان نتایج دست یافت (۱۶) که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

### الگوی فضایی پارامترهای مورد بررسی بر اساس شاخص موران جهانی

مقدار شاخص موران جهانی برای داده‌های شاخص کیفیت خاک IQI در مجموعه‌های کل - خطی (IQI<sub>WL</sub>\_TDS)، کل - غیرخطی (IQI<sub>WNL</sub>\_TDS)، حداقل - خطی (IQI<sub>WL</sub>\_MDS) و حداقل - غیرخطی (IQI<sub>WNL</sub>\_MDS)، به ترتیب برابر با ۰/۳۹، ۰/۴۳، ۰/۳۶ و ۰/۴ به دست آمد.



شکل ۳. نتایج شاخص موران جهانی، الف) مجموعه‌های کل - خطی (IQIwL\_TDS)، ب) کل - غیرخطی (IQIwNL\_TDS)، ج) حدافل - خطی (IQIwL\_MDS) و د) حدافل - غیرخطی (IQIwNL\_MDS)

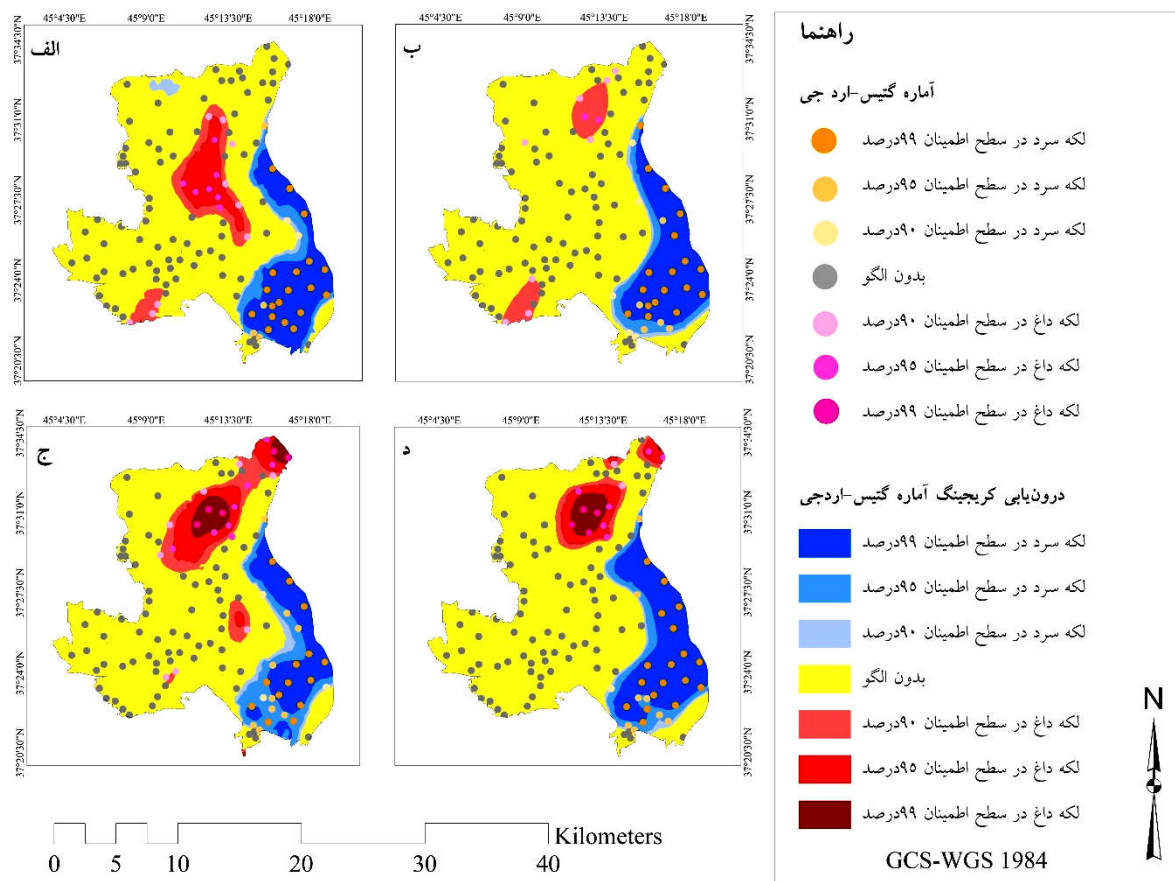
شوره‌زارهای ایجاد شده در اثر خشک شدن و کاهش بسیار زیاد آب دریاچه ارومیه و اراضی بایر اطراف آن در بخش شرق و جنوب شرق محدوده مطالعاتی است. سایر نقاط الگوی معناداری را نشان نداده و تنها بخشی از اراضی کشاورزی، تشکیل لکه‌های داغ یعنی خوشه‌های با کیفیت خاک بالا را داده‌اند (شکل ۴).

خشکسالی رخ داده در پی کاهش بارندگی، بهره‌برداری بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، حفر چاه‌های بی‌شمار و بدون نظارت و برداشت بی‌رویه از سفره‌های آبی برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی، عوامل اصلی روند کاهش شدید آب دریاچه ارومیه

در پژوهشی دیگر به منظور تحلیل فضایی هدایت الکتریکی خاک، مقدار شاخص موران ۰/۴۵ به دست آمده بود و توزیع خوشه‌ای شوری خاک در غرب ایران گزارش شد (۲۷).

#### شناسایی لکه‌های داغ با آماره گتیس اردجی

بر اساس نتایج تحلیل Getis-ord GI، ۷ الگو شامل جزایر سرد در سطح احتمال ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ فاقد الگوی معنادار و جزایر داغ در سطح احتمال ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ شناسایی شد (شکل ۴). بررسی پراکنش لکه‌های سرد یعنی خوشه‌های با شاخص کیفیت ضعیف نشان داد، این خوشه‌ها، شامل



شکل ۴. نتایج محاسبه و پهنه‌بندی آماره گتیس-آردجی، الف) مجموعه‌های کل - خطی (IQIwL\_TDS)، ب) کل - غیرخطی (IQIwNL\_TDS)، ج) حداقل - خطی (IQIwL\_MDS) و د) حداقل - غیرخطی (IQIwNL\_MDS)

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج شاخص کیفیت خاک تجمعی برای ارزیابی کمی کیفیت خاک از کارایی زیادی برخوردار بود. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تعیین سهم هر ویژگی حاصل از آنالیز تجزیه عامل در دو مجموعه TDS و MDS نشان داد، در مجموعه TDS ویژگی‌های نسبت جذب سدیم، درصد شن، درصد سدیم تبادلی و آهک فعال و در مجموعه MDS نسبت جذب سدیم و نیکل دارای وزن بیشتری در اراضی مورد مطالعه هستند. ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین دو مجموعه TDS و MDS در حالت خطی (۰/۷۳) و در حالت غیرخطی (۰/۸۵) محاسبه شد که کارایی مجموعه حداقل داده‌ها در ارزیابی کیفیت خاک را تأیید کرد. در نقشه‌های حاصل از

هستند. علاوه بر آن ساخت سدهای فراوان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، عامل تشدیدکننده کاهش میزان آب ورودی به دریاچه بوده است (۲۸). باتوجه به نتایج به دست آمده، اگر اقدامات مدیریتی مناسبی در راستای پیشگیری، کنترل و مقابله با لکه‌های داغ یعنی نقاط با کیفیت خاک ضعیف، انجام نشود، در سال‌های آینده با معضلات و خطرات زیست‌محیطی بی‌شماری از جمله افزایش شوره‌زارها و دشت‌های نمکی، طوفان‌های شدید نمکی، نوسانات اقلیمی شدید، از بین رفتن گونه‌های گیاهی و جانوری، از بین رفتن باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی از طریق جابه‌جایی نمک‌ها توسط باد و رسوب این ذرات بر روی اراضی حاصلخیز و خارج کردن این اراضی از عرصه تولید و به تبع آن خطر معیشت ساکنین مواجه خواهیم بود.

خاک شد که از نظر آماری معنادار هستند. بر این اساس خوشه‌های با کیفیت ضعیف در اراضی منتهی به دریاچه ارومیه در شرق و جنوب شرق محدوده مطالعاتی شکل گرفته است. پیشنهاد می‌شود، در پژوهش‌های آینده ارتباط بین کیفیت خاک و پارامترهایی از جمله کاربری اراضی، دمای سطح زمین و رطوبت خاک و همچنین توزیع فضایی عناصر سنگین و کم مصرف در منطقه مطالعاتی بررسی شود.

درون‌یابی، محدوده و تعداد طبقات توسط کاربر تعیین می‌شود و تنها می‌توان محدوده‌های با مقادیر زیاد و کم را شناسایی کرد. در صورتی که در این پژوهش استفاده از نتایج آماره - گتیس ارد جی بر اساس مقادیر Z-Score در کنار روش‌های درون‌یابی باعث شد، مرز و تعداد دقیق طبقات با اطمینان از توزیع مکانی - آماری تعیین شود. به عبارتی استفاده از این روش موجب شناسایی طبقات مختلف کیفیت

### منابع مورد استفاده

1. Akhyani, A., H. R. Matinfar and H. Asadi Rahmani. 2020. determination the effects of land use change and soil type on some quality properties of soil along a north - south transect (case study miami county of semnan province). *Environmental Sciences*. 20(2): 223-244 (In Farsi).
2. Andrews, S., D. Karlen and J. Mitchell. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 90: 25-45.
3. Arshad. M. A and S. Martin. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems Author links open overlay panel. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 88(2):153-160.
4. Askari, M. S and N. M. Holden. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research*. 150: 57-67.
5. Aziz, I., M. Ashraf., T. Mahmood and K. R. Islam. 2011. Crop rotation impact on soil quality. *Pakistan Journal of Botany*. 43 (2): 949-960 (In Farsi).
6. Bunemann, E. K., G. Bongiorno, Z. Bai, R. E. Creamer, G.D Deyn, R. Goede, L. Fleskens, V. Geissen, T.W. Kuyper, P. Mader, M. Pulleman, W.Sukkel, J. W. Groenigen and L. Brussaard. 2018. Soil quality- A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120: 105-125.
7. Burt, R. 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. USA. 700. Changes in Europe. An impact assessment of soil quality in Europe. *Ecological Indicators*. 11(1): 4-15.
8. Chen, W., Y., Cai and K. Zhu. 2022. Spatial heterogeneity analysis and source identification of heavy metals in soil: a case study of Chongqing, Southwest China. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture (CBTA)*. 9(50): 1-18.
9. Dahnke, W. C., and G. V. Johnson. 1991. Testing Soils for Available Nitrogen. PP. 127-139. In: R. L. Westerman (Eds.), soil Testing and plant analysis, American Society of Agronomy, Madison
10. Das, N and D. P. Angadi. 2020. Land use-land cover (LULC) transformation and its relation with land surface temperature changes: A case study of Barrackpore Subdivision, West Bengal, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 19: 1-28.
11. Dhose, T., M. Cougnon, A. De Vlieghe, B. Vandecasteele, N. Viaene, W. Cornelis and D. Reheul. 2014. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application. *Applied Soil Ecology*. 75: 189-198.
12. Doran, J. W and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*. 35: 1-21
13. Gee, G. W. and D. Or. 2002. Particle Size Analysis, In: Dane, J. H and G.C Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4, *Physical Methods, Soils Science Society of America, Madison*: 255-293.
14. Getis, A and J. K. Ord. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geogr Anal*. 24(3): 189-206.
15. Ghahramanpoor, R., M. Gorji, A. A. Pourbabaee and M. Farahbakhsh. 2019. Investigating the effects of conservation and reduced tillage systems on soil quality indices. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 49(6): 1355-1364 (In Farsi).
16. Hematifard A., M. Naderi, A. Karimi and J. Mohammadi. 2019. Assessment Quantitative of Soil Quality in Different Uses of Shahrekord Plain Using the Analytical Hierarchical Process (AHP). *Journal of Water and Soil Science*. 23 (1):293-307 (In Farsi).



17. Hemmati, S., N. Yaghmaeian Mahabadi, M. B. Farhangi and A. Sabouri. 2019. Assessing soil quality indices and their relationships with rice yield in paddy fields of central Guilan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 9(1): 135-150.
18. Kowe, P., O. Mutanga, J. Odindi and T. Dube. 2021. Effect of landscape pattern and spatial configuration of vegetation patches on urban warming and cooling in Harare metropolitan city, Zimbabwe. *GIS Science and Remote Sensing*. 58(2): 261-280
19. Liu J., H. Kang, W. Tao, H. Li, D. He, L. Ma, H. Tang, S. Wu, K. Yang and X. Li. 2022. A spatial distribution – Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil. *Science of The Total Environment*. 859(1): 1-18.
20. Liu, J., L. Wu, D. Chen, Z. Yu and C. Wei. 2018. Development of a soil quality index for *Camellia oleifera* forestland yield under three different parent materials in Southern China. *Soil and Tillage Research*. 176: 45-50.
21. Liu, W., L. Ma, Z. Smanov, K. Samarkhanov and J. Abuduwaili. 2022. Clarifying Soil Texture and Salinity Using Local Spatial Statistics (Getis-Ord  $G_i^*$  and Moran's  $I$ ) in Kazakh–Uzbekistan Border Area, Central Asia. *Agronomy*. 12(2): 1-14.
22. Lopez-Granados, F., M. Jurado-Exposito, S. Atenciano, A. Garcla-Ferrer, M. Sanchez Orden and L. Garcla-Torres. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil*. 246(1): 97-105.
23. Maghami Moghim, F., A. Karimi, M. Bagheri Bodaghabadi and H. Emami. 2022. Evaluating the role of different management systems on soil quality index using crop yield (case study: neyshabour plain, iran). *Water and Soil*. 36(1) 95-112 (In Farsi).
24. McLean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*. 9, 199-224.
25. Mesfin D., E. Assefa and B. Simane. 2022. Variability of soil quality indicators along with the different landscape positions of Choke Mountain agroecosystem, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Heliyon*. 8(7): 1-19.
26. Mirkhani, R., A. R. Vaezi and H. rezaei. 2020. Investigation of the Soil Quality Indices in Irrigated Wheat Farms of Nazarabad Region in West of Alborz Province. *Water and Soil*. 34(5): 1125-1139 (In Farsi).
27. Mirmousavi, S. H., K. Raispour and M. Kamangar. 2020. Monitoring and Evaluation of Spatial Variations in Soil Electrical Conductivity Using Remote Sensing. *Iranian journal of Ecohydrology*. 7(4): 1113-1126 (In Farsi).
28. Nazmfar, H and M. Shirzad. Monitoring land use changes in Lake Urmia and its surroundings using various methods of statistical training theory. *The Journal of Spatial Planning*. 24 (3): 201-229 (In Farsi).
29. Nosrati, K. and M. Majdi. 2018. Soil Quality Assessment in Western Part of Tehran using Minimum Data set Method. *Journal of Water and Soil Science*. 21 (4): 177-188 (In Farsi).
30. Olson, R. V and J. R. Roscoe Ellis. 1982. Iron. PP. 301-312. In: A. L. Page (Eds.), *Methods of soil analysis*. Part II. American Society of Agronomy, Inc and Soil Science Society of America, Inc. Madison.
31. Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney. 1982. *Methods of soil analysis*. Part 2. American Society of Agronomy, Inc and Soil Science Society of America, Inc. Madison.
32. Pusch M., L. G. Agda, V. OliveiraJulyane, R. FontenelliLucas and D. Amaral. 2021. Soil properties mapping using proximal and remote sensing as covariate. *Engenharia Agrícola*. 41(6): 634-642
33. Qaimian, N. 2000. Revision and update of semi-detailed soil studies in southern Urmia. *West Azerbaijan Agricultural Research Center*. (In Farsi).
34. Qi, Y., J. L. Darilek, B. Huang, Y. Zhao, W. Sun and Z. Gu. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*. 149(3-4): 325-334.
35. Rahmanipour, F., R. Marzaioli, H. A. Bahrami and Z. Fereidouni. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*. 40: 19–26.
36. Samie, F., N. Yaghmaeian Mahabadi, S. Abrishamkesh and A. Maslahatjou. 2022. Impact of land use change on erodibility and soil quality indicators (case study: Sidasht, Guilan Province). *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)*. 45(1): 1-16.
37. Santos-Frances, F., A. Martnez-Graoab, C. vila-Zarza, M. Criadoa and S. Yolanda. 2019. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystemb and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma*. 354:1-18.
38. Shakouri, M., M. Shabanpour, N. Davatgar and M. Vazifehdoust. 2021. Assessment of Soil Quality in Paddy Soils with Different Yields (A Case Study: Kouchsfahan, Guilan Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(12) (In Farsi).
39. Shao, G., J. Ai, Q. Sun, L. Hou and Y. Dong. 2020. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China. *Ecological Indicators*. 115: 1-10.
40. Sparks, R. S., D. L. Sparks, A. L. Page and P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Sumner. 1996. *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods*, Part 3. by the Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison.

41. Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29–38.
42. Yemefack, M., V. G. Jetten and D. G. Rossiter. 2006. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil and Tillage Research*. 86: 84–98.
43. Zhang Y., L. Wang, J. Jiang, J. Zhang, Z. Zhang and M. Zhang. 2022. Application of soil quality index to determine the effects of different vegetation types on soil quality in the Yellow River Delta wetland. *Ecological Indicators* 141:1-19.

## Application of Minimal Data Sets for Quantitative Assessment and Investigation of Spatial Autocorrelation of Soil Quality in Southwestern Lands of Urmia Plain

A. Barikloo<sup>1</sup>, S. Rezapour<sup>2\*</sup>, P. Alamdari<sup>1</sup> and R. Taghizadeh-Mehrjardi<sup>3</sup>

(Received: June 10-2023 ; Accepted: August 13-2023)

### Abstract

Soil quality is one of the most crucial factors determining crop productivity and production stability. The soil's physical, chemical, biological, and ecological characteristics affect its quality. Numerous researchers have concentrated the evaluation on a small number of soil quality indicators because measuring all soil quality indicators would be time-consuming and expensive. This study looked at the spatial autocorrelation of soil quality in the southwest areas of the Urmia Plain to establish the minimal data set for quantitative assessment. To accomplish this, 120 composite soil samples were collected from a depth of 0 to 60 cm, and the soil quality index was then calculated using the IQI method in 4 modes: Total-Linear (IQIwL-TDS), Total-Nonlinear (IQIwNL-TDS), Minimum-Linear (IQIwL-MDS), and Minimum nonlinearity (IQIwNL-MDS). 22 physical and chemical characteristics were used to choose the data set. The characteristics of sand percentage, sodium absorption ratio, cation exchange capacity, Available phosphorus, active calcium carbonate, and nickel concentration were chosen as the minimum data set (MDS) using the decomposition method into principal components. The linear IQIMDS mode produced the greatest soil quality index result, whereas the non-linear IQIMDS mode produced the lowest. The non-linear mode of the IQI index has a greater correlation coefficient ( $R^2=0.85$ ) than the linear mode of the IQI index ( $R^2=0.73$ ), according to an analysis of the linear and non-linear correlation coefficient between the soil quality index with the total category and minimum data. The findings of computing the global Moran's index for study sets of IQI soil quality index data revealed that the soil quality data are not independent of each other and are spatially autocorrelated, distributed in clusters, and have spatial autocorrelation. Getis-ord GI statistics indicated that the eastern and southeastern parts of the research region comprise clusters with poor soil quality, salt marshes produced by Lake Urmia's drying up, and surrounding arid plains.

**Keywords:** Physical and chemical characteristics, IQIw, PCA, Global Moran Index, Getis-ord GI

---

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Urmia, Urmia, Iran.

3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Ardakan, Yazd, Iran.

\*: Corresponding author, Email: S.Rezapour@urmia.ac.ir