

بررسی وضعیت پایداری خاک‌های کشاورزی دشت کرج

حجت امامی*¹

استادیار گروه علوم خاک دانشگاه فردوسی مشهد؛ hemami@um.ac.ir

چکیده

در مطالعه کیفیت خاک، جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن مورد توجه قرار می‌گیرد. کیفیت خاک در ارزیابی تخریب یا بهبود اراضی اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق کیفیت خاک در 140 نمونه از خاک‌های کشاورزی دشت کرج با استفاده از دو روش رتبه تجمعی (CR) و شاخص پایداری (SI) ارزیابی شد. پارامترهای درصد کربن آلی (OC)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف (شاخص Sgi)، رطوبت قابل استفاده گیاه (AWC)، تخلخل تهویه‌ای (Fa) اسیدیته (pH) هدایت الکتریکی (ECe) و نسبت جذب سدیم (SAR) در عصاره اشباع، بافت خاک، رطوبت ظرفیت مزرع‌های نسبی (RFC) و جرم مخصوص ظاهری (Bd) در تمامی 140 نمونه اندازه‌گیری شدند. شاخص پایداری با استفاده از پارامترهای شاخص AWC, MWD, Bd, Fa, Sgi و OC تعیین شد. در روش رتبه تجمعی فاکتور وزنی نسبی (RFC) برای همه ویژگی‌های فوق محاسبه شد و وضعیت پایداری براساس حاصل جمع مقادیر RFC مشخص گردید. نتایج شاخص پایداری نشان داد که 62/14 درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای کیفیت نامناسبی برای کشاورزی بودند. در روش رتبه تجمعی نیز فقط 2/14 درصد خاک‌های مورد مطالعه دارای وضعیت پایدار بودند، 37/86 درصد خاک‌های مورد مطالعه به شرطی برای کاربری کشاورزی پایدار خواهند ماند که از روش‌های مدیریت مناسب‌تری (مثل برگرداندن بقایای گیاهی به خاک، کاهش عملیات خاک‌ورزی و شیوه‌های نوین آبیاری) استفاده شود و 60 درصد نمونه‌ها نیز دارای وضعیت ناپایداری برای کشاورزی بودند. بنابراین مدیریت ویژه‌ای برای ناحیه مورد نظر که در مناطق خشک و نیمه خشک واقع شده است ضروری به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: شاخص پایداری، رتبه تجمعی، کیفیت خاک، مدیریت خاک

مقدمه

بستگی دارد (تاپ و همکاران 1997، رینولدز و همکاران 2002). هنگامی خاک دارای کیفیت فیزیکی خوبی است که ساختمان آن پایدار باشد، در برابر فرسایش و فشردگی مقاوم باشد، و در عین حال امکان رشد و توسعه ریشه و تکثیر گیاهان و ریزجانداران خاک در آن وجود داشته باشد (رینولدز و همکاران، 2002). همچنین خاک با کیفیت خوب توانایی انتقال و ذخیره آب را دارد به طوری که نسبت مناسبی از آب، املاح غذایی محلول و هوای خاک را به منظور ایجاد شرایط مناسب برای

یکی از مسائل مهم برای تعیین کیفیت خاک، انتخاب شاخص‌هایی است که بیانگر برقراری تعادل مناسب از آب و هوا در ناحیه رشد ریشه باشد. پژوهشگران مختلف بر اهمیت کیفیت فیزیکی خاک در رشد گیاه و وضعیت شیمیایی و بیولوژیکی خاک تأکید کرده‌اند (سیلوا و کی 1996، دروری و همکاران 2003، آلماراس و همکاران 2002). کیفیت فیزیکی خاک‌های کشاورزی عمدتاً به پایداری ساختمان خاک و توانایی آن در انتقال و ذخیره سازی آب در ناحیه توسعه ریشه

¹ آدرس نویسنده مسئول: مشهد میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

* دریافت: مهر 1390 و پذیرش: شهریور 1391

منعکس کننده‌ی حاصلخیزی خاک یا عملگرهای زیست محیطی هستند و برای مشخص نمودن کاهش، ثبات و یا بهبود وضعیت پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از شاخص‌ها به جای ویژگی‌های خاک برای کمی کردن کیفیت خاک مفید می‌باشند زیرا شاخص‌ها نمایانگر اثرات تجمعی ویژگی‌های خاک با در نظر گرفتن مقدار وزنی هر ویژگی با توجه به نقشی که در کیفیت خاک دارند، می‌باشند (سینگ و خرا 2009). مطالعه تخریب زمین از طریق کیفیت خاک که نشان دهنده عملگرهای خاک در هر بوم نظام است برای مدیریت پایدار منابع زمین ضروری می‌باشد.

با توجه به اهمیت کیفیت خاک در ارزیابی تخریب یا بهبود اراضی، در این تحقیق از دو روش رتبه تجمعی و شاخص پایداری برای ارزیابی شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک در تعدادی از خاک‌های کشاورزی دشت کرج استفاده شد. روش اول بر اساس چارچوب مفهومی گومز و همکاران (1996) برای سنجش پایداری سیستم‌های کشاورزی در مقیاس مزرعه است. در روش دوم که توسط شوکلا و همکاران (2004) ارائه شده است سطوح بحرانی ویژگی‌ها با در نظر گرفتن فاکتور وزنی برای ارزیابی پایداری کاربری زمین تعیین می‌شوند.

مواد و روشها

برای ارزیابی کیفیت خاک 140 نمونه خاک از دشت کرج جمع‌آوری شد. برای تهیه نمونه‌های دست‌نخورده بعد از حذف سنگریزه‌های سطحی از سیلندری به قطر و ارتفاع 5 سانتی‌متر استفاده شد. پنج پارامتر مرتبط با ساختمان خاک یعنی درصد کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف، رطوبت قابل استفاده گیاه و جرم مخصوص ظاهری تعیین شدند. انتخاب نوع خاک‌ها بر این اساس صورت گرفت که دامنه وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را در بر گیرد. نمونه‌های دست‌خورده پس از انتقال به آزمایشگاه هواخشک شده، به آرامی کوبیده و از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند و تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی بر روی آنها انجام شد.

علاوه بر این میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با توجه به جرم خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک (به قطرهای 2000، 1000، 500، 250، 120 و 50 میکرون) به روش الک تر، اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (ECe) نمونه‌ها پس از اشباع خاک به مدت 24 ساعت در عصاره گل اشباع با استفاده از دستگاه‌های pH متر و هدایت سنج الکتریکی اندازه‌گیری شدند. کربن آلی به روش والکلی و بلک، رطوبت قابل استفاده گیاه از تفاضل رطوبت در

تولید حداکثر محصول و حداقل تخریب زیست محیطی فراهم می‌نماید (ناپ و همکاران، 1997).

والاس و تری (1998) و لال و همکاران (1999) بیان کردند که کشت زیاد و متراکم محصولات کشاورزی می‌تواند باعث کاهش کیفیت فیزیکی خاک‌ها شود. این امر موجب کاهش کارایی و سودبخشی تولید محصول گشته، تأثیرات منفی بر محیط‌زیست داشته، و موجب ایجاد فرسایش آبی و بادی و آبشویی و ورود آفت-کشها و عناصر غذایی به منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود (والاس و تری، 1998). علاوه بر این کشت متراکم و پیوسته و برنگرداندن بقایای گیاهی، سبب کاهش مقدار پوشش سطحی شده و از کیفیت و کمیت کربن آلی خاک و در نتیجه کیفیت خاک کاسته می‌شود (لال و همکاران 1999).

امروزه کیفیت فیزیکی خاک با تعیین پارامترهای فیزیکی که درجه کیفیت خاک را تعیین می‌کنند بیان می‌شود. در زمین‌های کشاورزی وقتی پارامترهای تعیین کننده کیفیت خاک در محدوده بهینه قرار داشته باشند، عملکرد محصول به بیشترین مقدار می‌رسد و تخریب خاک و محیط زیست کاهش می‌یابد (رینولدز و همکاران، 2009). برخی از مهمترین پارامترهای کیفیت فیزیکی خاک در خاک‌های کشاورزی عبارتند از رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نسبی (RFC)، ظرفیت آب در دسترس گیاه (PAWC)، تخلخل تهویه‌ای (AC)، جرم مخصوص ظاهری (BD) و درصد کربن آلی (OC) (رینولدز و همکاران، 2009). همچنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) نیز به عنوان پارامتر تأثیر گذار بر کیفیت خاک ذکر شده است (دنف و همکاران، 2001). این پارامترها به طور مستقیم یا غیرمستقیم در تأمین و حفظ آب، هوا و عناصر غذایی مورد نیاز محصولات کشاورزی نقش دارند (رینولدز و همکاران، 2009). اخیراً دکستر (2004) شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف یا پارامتر $S_{p0.05}$ را به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک مطرح نموده است که با بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی، تراکم خاک، مقدار بهینه آب خاک برای انجام شخم، مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه، مقدار آب در دسترس گیاه و پایداری ساختمانی خاک رابطه دارد.

گومز و همکاران (1996) چارچوبی را برای سنجش پایداری سیستم‌های کشاورزی در مقیاس مزرعه بر اساس کمی نمودن شاخص‌های کیفیت خاک ارائه نمودند. شاخص‌های کیفیت خاک شامل ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری می‌باشند یعنی ویژگی‌هایی از خاک که

اساس میانگین حسابی فاکتور تأثیر شش پارامتر مرتبط با شاخص پایداری محاسبه شد. اگر شاخص پایداری به دست آمده کمتر از یک باشد به صورت ناپایدار (NS) بیان می‌شود (گومز و همکاران ۱۹۹۶). در انتها ضرایب همبستگی بین شاخص پایداری و پارامترهای مرتبط با آن نیز محاسبه شد.

برای تعیین حدود بحرانی در روش رتبه تجمعی از حدود پیشنهادی لال (۱۹۹۴) استفاده شد (جدول ۱) که این حدود بحرانی براساس محدودیت در تولید محصول ارائه شده‌اند و این دامنه شامل بدون محدودیت تا محدودیت شدید و از مقیاس ۱ تا ۵ به صورت فاکتور وزنی نسبی (RWF^2) مشخص گردید (شوکلای و همکاران ۲۰۰۴). حد پایینی یعنی عدد یک برای هر ویژگی خاک نمایانگر بدون محدودیت (کیفیت عالی خاک) و حد بالایی یعنی عدد ۵ نشان دهنده محدودیت شدید می‌باشد. شاخص پایداری (جدول ۲) بر اساس رتبه تجمعی (CR^3) هر خاک از خیلی پایدار ($CR < 20$) تا ناپایدار ($CR > 40$) توسط لال (۱۹۹۴) پیشنهاد شده است. در این روش به جای پارامترهای سرعت نفوذ آب در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و خاکدانه‌های پایدار در آب از پارامترهای شاخص SAR ، Sgi و RFC استفاده شد. رتبه‌ای که برای شاخص Sgi در این تحقیق در نظر گرفته شده است بر اساس نتایج دکستر (۲۰۰۴) و رینولدز (۲۰۰۹) می‌باشد، که این محققین شاخص Sgi کمتر از ۰/۰۲۰ را به عنوان وضعیت بسیار ضعیف و مقادیر Sgi بالاتر از ۰/۰۵۰ را به عنوان وضعیت بسیار خوب کیفیت خاک و مقدار ۰/۰۳۵ را مرز وضعیت خوب و ضعیف ساختمان خاک در نظر گرفتند، لذا مقیاس ۱ تا ۵ بر این اساس تعیین شد. برای فاکتور وزنی رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نسبی نیز از فرضیه رینولدز و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شد که مقدار مطلوب آن ۰/۶ تا ۰/۷ است. با توجه به اینکه وجود سدیم زیاد در خاک سبب پراکنش ذرات و تخریب ساختمان خاک می‌شود (برزگر، ۱۳۸۰) و بر سرعت نفوذ آب در خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع تأثیر می‌گذارد (بای بوردی، ۱۳۷۹)، لذا برای درجه‌بندی SAR نیز از جدول راهنمای تفسیر کیفیت آب آبیاری بر نفوذپذیری استفاده شد (علیزاده، ۱۳۸۰). حدود بحرانی و فاکتور وزنی نسبی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در روش رتبه تجمعی در جدول ۱ ارائه شده است و وضعیت پایداری خاک بر اساس شاخص رتبه تجمعی که

مکش‌های ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال و جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه و پوشش دادن با پارافین تعیین شدند. شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف آن^۱ (شاخص Sgi)، با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی که مقادیر رطوبت در مکش‌های صفر، ۱۵، ۲۵ و ۵۵ سانتی متر توسط ستون آب آویزان و در مکش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار توسط دستگاه صفحات فشاری تعیین شده بود، با برازش داده‌های منحنی رطوبتی با مدل وان‌گن‌اختن (نرم افزار RETC؛ وان‌گن‌اختن و همکاران، ۱۹۹۰) و بر اساس معادلات زیر تعیین شد (دکستر ۲۰۰۴).

$$Sgi = \left| -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \right| \quad (1)$$

در معادله فوق θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی‌مانده ($g \cdot g^{-1}$)، و m پارامتر تجربی معادله وان‌گن‌اختن (۱۹۸۰) است.

علاوه بر این مقدار تخلخل تهویه‌ای (Fa) از تفاضل رطوبت اشباع و رطوبت در مکش ۱۰۰ سانتی‌متر و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نسبی (RFC) از حاصل تقسیم رطوبت ظرفیت مزرعه (مکش ۳۳ کیلو پاسکال) بر رطوبت اشباع محاسبه شد (رینولدز ۲۰۰۹).

شاخص پایداری بر اساس روش گومز و همکاران (۱۹۹۶) تعیین شد، در این تحقیق با توجه به اینکه عمق خاک پارامتر محدود کننده‌ای برای کیفیت فیزیکی خاک محسوب نمی‌شد از پارامترهای دیگری مثل شاخص Sgi و تخلخل تهویه‌ای (Fa) که همبستگی بیشتری با ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک دارند، استفاده شد. سایر پارامترهای مرتبط با شاخص پایداری در این تحقیق شامل جرم مخصوص ظاهری، MWD ، ظرفیت آب قابل استفاده گیاه و کربن آلی خاک بودند (گومز و همکاران ۱۹۹۶). مقدار میانگین هر پارامتر در خاک‌های مورد مطالعه به عنوان حد بحرانی آنها لحاظ شد. سپس فاکتور تأثیر هر پارامتر از حاصل تقسیم مقادیر پارامتر مورد نظر در خاک مورد مطالعه بر حد بحرانی آن پارامتر محاسبه شد (گومز و همکاران ۱۹۹۶). در این روش هر چه فاکتور تأثیر بزرگ‌تر باشد آن پارامتر نقش مهم‌تری در بهبود پایداری خاک ایفا می‌کند. مقدار یک یا بیشتر برای فاکتور تأثیر هر پارامتر نمایانگر همبستگی مثبت آن با پایداری خاک می‌باشد در حالیکه مقادیر کمتر از یک نشان دهنده نقش آنها در کاهش پایداری است. سرانجام شاخص پایداری بر

² Relative weighing factor

³ Cumulative rating

¹ Slope of retention curve at inflection point (Sgi Index)

از فاکتور وزنی نسبی 11 ویژگی محاسبه شده است، نیز در جدول 2 ارائه شده است.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که شاخص پایداری تنها در 74 نمونه خاک مورد مطالعه در این تحقیق بالاتر از یک بوده و در 66 نمونه دیگر کمتر از یک می‌باشد بنابراین با توجه به نتایج شاخص پایداری، در 47/14 درصد از خاک‌های مورد مطالعه سیستم مدیریتی نامناسب بوده و در واقع این زمین‌ها برای کشاورزی مناسب نیستند و 52/86 درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای وضعیت پایدار می‌باشند. ضرایب همبستگی شاخص پایداری خاک‌های مورد مطالعه با پارامترهای مرتبط با شاخص پایداری در جدول 3 نشان داده شده است. نتایج جدول 3 نشان داد که درصد کربن آلی و آب قابل استفاده گیاه دارای بیشترین همبستگی با شاخص پایداری بودند و در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. بسیاری از محققین بر نقش کربن آلی به عنوان مهم‌ترین شاخص کیفیت خاک تأکید نموده‌اند (لال، 1993؛ گریکورچ و همکاران، 1997، لال و همکاران 1999؛ گوارتز و همکاران، 2006؛ شوکلا و همکاران، 2006) بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کربن آلی خاک و آب قابل استفاده گیاه از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده کیفیت خاک در روش شاخص پایداری در این تحقیق می‌باشند. سایر پارامترهای مؤثر بر شاخص پایداری (یعنی Sgi, Fa, Bd و MWD) نیز دارای همبستگی بالا و معنی‌داری با شاخص پایداری بودند. که در این بین تنها جرم مخصوص ظاهری با شاخص پایداری رابطه‌ی منفی داشت که نشان می‌دهد با افزایش جرم مخصوص ظاهری و تراکم خاک شاخص پایداری کاهش می‌یابد. از این رو می‌توان گفت این شش پارامتر، پارامترهای مناسبی برای تعیین شاخص پایداری می‌باشند. علاوه بر این بین این پارامترهای مؤثر بر شاخص پایداری نیز همبستگی معنی‌داری وجود داشت که در جدول 3 ارائه شده است و نشان می‌دهد که اثر متقابل آنها می‌تواند بر کیفیت خاک و شاخص پایداری تأثیر بیشتری داشته باشد.

همان گونه که اشاره شد تقریباً نیمی از خاک‌های مورد مطالعه دارای وضعیت ناپایداری بودند. جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای محدود کننده کیفیت خاک، فاکتور تأثیر آنها مورد بررسی قرار گرفت. فاکتور تأثیر ناشی از جرم مخصوص ظاهری در 37/14%، کربن آلی و شاخص Sgi 57/14%، تخلخل تهویه‌ای 52/14%، آب قابل استفاده گیاه 60% و MWD 50/71% از خاک‌های مورد مطالعه کمتر از یک بود. بنابراین بر اساس فاکتور تأثیر می‌توان

گفت مهم‌ترین عوامل ایجاد محدودیت در مناطق مورد مطالعه به ترتیب آب قابل استفاده گیاه، کربن آلی و شاخص Sgi، تخلخل تهویه‌ای، MWD و جرم مخصوص ظاهری می‌باشند. البته همان طور که گفته شد این پارامترها با هم همبستگی معنی‌داری داشتند (جدول 3) که به نوبه‌ی خود بیانگر تأثیر متقابل این فاکتورها بر یکدیگر است. مثلاً کاهش کربن آلی باعث کاهش شاخص Sgi (امامی 1387، دکستر، 2004) و افزایش جرم مخصوص ظاهری (امامی 1387، دکستر، 2004) می‌گردد.

نتایج حاصل از فاکتور وزنی نسبی پارامترهای تأثیر گذار بر رتبه تجمعی نشان داد که ترتیب فراوانی بافت خاک در این تحقیق شامل 42/14 درصد لوم رسی (کلاس 3 با محدودیت متوسط)، 29/29% رسی (کلاس 5 با محدودیت شدید)، 16/43% شامل کلاس‌های بافتی لوم رسی شنی، لوم سیلتی و لوم رسی سیلتی (کلاس 2 با محدودیت کم)، 9/29% بافت لوم (بدون محدودیت) و 2/86% نیز رسی سیلتی (کلاس 4 با محدودیت زیاد) بود. بر این اساس 67/86 درصد از خاک‌های مورد مطالعه از نظر توزیع اندازه ذرات در دامنه بدون محدودیت تا محدودیت متوسط قرار دارند و تنها 32 درصد دارای محدودیت زیاد و شدید می‌باشند. روند تقریباً مشابهی در مورد کلاس‌های مختلف جرم مخصوص ظاهری نیز مشاهده شد. به گونه‌ای که 7/14، 11/43، 31/43، 45 و 5 درصد خاک‌های مورد مطالعه از نظر جرم مخصوص ظاهری به ترتیب در کلاس یک تا 5 قرار داشتند و 50 درصد از این خاک‌ها بدون محدودیت تا محدودیت متوسط از نظر جرم مخصوص ظاهری و تراکم خاک بودند.

نتایج نشان داد که pH 95 نمونه (67/86%) در کلاس 5 یعنی محدودیت شدید (بالاتر از 8/2)، 37 نمونه (26/43%) در کلاس محدودیت زیاد (7/8-8/2)، 7 نمونه (5%) در کلاس محدودیت متوسط (7/4-7/8) و تنها یک نمونه در کلاس محدودیت کم (7/0-7/4) قرار داشت از آنجا که بسیاری از عناصر کم‌مصرف و فسفر در محدوده pH خشتی توسط گیاهان جذب می‌شوند (سالاردینی، 1374) و در هیچ یک از نمونه‌های مورد بررسی pH در دامنه 6-7 یعنی کلاس یک و بدون محدودیت قرار نگرفت، می‌توان گفت pH خاک یکی از عوامل مهم محدودیت پایداری زمین‌های مورد بررسی است. البته با توجه به آهکی بودن خاک‌های مناطق مورد بررسی چنین نتیجه‌ای دور از انتظار نبود. از دیگر پارامترهای شیمیایی در روش رتبه تجمعی EC و SAR عصاره اشباع خاک بود که فاکتور وزنی تقریباً یکسانی بر مقادیر رتبه تجمعی

می‌باشند و باعث افزایش آن در این تحقیق شده‌اند که امامی و همکاران (1387 و 1386) بین آهک و شاخص Sgi همبستگی مثبت و معنی‌داری گزارش نموده‌اند.

تخلخل تهویه‌ای خاک‌های مورد بررسی از وضعیت نسبتاً مطلوبی برخوردار بود، به طوری که 66/43 درصد بدون محدودیت و 12/86 درصد دارای محدودیت کم (کلاس 2) از نظر تخلخل تهویه‌ای بودند. همچنین 14/28 در کلاس 3 و 6/43 درصد نیز در کلاس 4 یا محدودیت زیاد از نظر تخلخل تهویه‌ای قرار گرفتند. با توجه به اینکه تخلخل تهویه‌ای با بافت و درجه تراکم خاک در ارتباط است و همانطور که نتایج نشان داد محدودیت جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با سایر پارامترهای مؤثر بر شاخص رتبه تجمعی در این تحقیق کمتر بود و از سوی دیگر دامنه وسیعی از کلاس‌های بافتی در این خاک‌ها وجود داشت و توزیع اندازه ذرات به گونه‌ای بوده است که محدودیتی بر تخلخل تهویه‌ای خاک نداشته‌اند. اکثر خاک‌های مورد مطالعه (77/86%) از نظر آب قابل استفاده گیاه دارای محدودیت متوسط (کلاس 3) و 20 درصد نیز دارای محدودیت زیاد بودند. علاوه بر این 2/14 درصد دارای محدودیت کم بودند. اگرچه هیچ یک از نمونه‌ها دارای محدودیت شدید نبودند ولی به هر حال همه‌ی آنها به نوعی دارای محدودیت کم تا زیاد بودند و در نتیجه از نظر آب قابل استفاده گیاه نیز وضعیت پایداری نداشتند. از نظر پارامتر RFC نیز مشابه AWC تقریباً نیمی از نمونه‌ها (55%) در کلاس 3 یا محدودیت متوسط و پس از آن 27/14 درصد در کلاس محدودیت کم و 11/43 درصد نیز در کلاس محدودیت زیاد قرار داشتند که تقریباً با آب قابل استفاده گیاه همخوانی دارد.

نتایج روش رتبه تجمعی نیز نشان داد که مقدار CR به دست آمده با این روش فقط در 6 نمونه خاک (4/29%) از خاک‌های مورد مطالعه کمتر از 25 بوده و به عبارتی تنها 4/29 درصد خاک‌های مورد مطالعه دارای وضعیت پایدار می‌باشند. در 50 نمونه (35/71 درصد) که مقادیر CR آنها بین 25 تا 30 بود به شرطی خاک‌های مورد مطالعه برای کاربری کشاورزی پایدار خواهد ماند که از نهاده‌های بیشتری استفاده شود و در سایر موارد (60%) مقادیر CR بیشتر از 30 بود که این نتایج نشان می‌دهد 60 درصد از زمین‌های مورد مطالعه برای کاربری کشاورزی مناسب نیستند. میانگین مقادیر CR در 140 نمونه خاک نیز 31/74 بود که نشان دهنده نامناسب بودن کاربری کشاورزی در مناطق مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به نتایجی که در بالا به آنها اشاره شد. تقریباً بین عوامل مؤثر بر رتبه تجمعی و مقادیر CR نهایی نیز همبستگی

داشتند. شوری در 8/57 و SAR در 7/86 درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای محدودیت شدید بودند، 15/71 و 16/43 درصد موارد به ترتیب دارای محدودیت زیاد شوری و SAR بودند (کلاس 4). محدودیت شوری در دو کلاس کم و متوسط با 10/71 درصد یکسان بود چنین روندی تقریباً در مورد SAR نیز مشاهده شد ولی درصد نمونه‌هایی که در دو کلاس کم و متوسط قرار گرفتند حدود 22/5 درصد بود. به طور مشابه بیشترین فراوانی برای هر دو پارامتر EC و SAR مربوط به کلاس بدون محدودیت بود که 30/71 درصد از خاک‌ها بدون محدودیت شوری و 54/29 درصد نیز فاقد محدودیت SAR بودند. به طور کلی 65 درصد از خاک‌های مورد مطالعه دارای محدودیت کم و یا بدون محدودیت شوری و SAR بودند. با توجه به اینکه سدیم بر ساختمان خاک تأثیرگذار است و علاوه بر ساختمان فیزیکی خاک، بر وضعیت تغذیه‌ای گیاهان نیز تأثیر می‌گذارد لذا استفاده از آن به عنوان جایگزین هدایت هیدرولیکی اشباع برای تعیین شاخص پایداری و کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد می‌گردد.

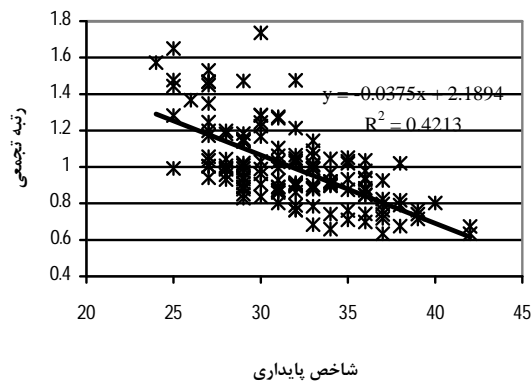
تقریباً تمامی خاک‌های مورد مطالعه دارای کربن آلی کمی بودند و همه‌ی آنها دارای محدودیت متوسط و زیاد کربن آلی بودند (22/86% در کلاس 4 و 75/71% در کلاس 3). پارامتر MWD که برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز در خاک‌های مورد بررسی دارای وضعیت نامطلوبی بود، به طوری که 22/14 درصد (31 نمونه) در کلاس 5، 65/71 درصد (92 نمونه) در کلاس با محدودیت زیاد و 12/14 درصد (17 نمونه) در کلاس با محدودیت متوسط قرار گرفتند و مشابه کربن آلی هیچ کدام از آنها در کلاس یک و دو قرار نگرفتند. با توجه به فقر کربن آلی در خاک‌های مورد بررسی که یکی از عوامل مهم در تشکیل خاکدانه‌ها و پایداری ساختمان خاک است (برزگر، 1380؛ بایوردی، 1379) و به نتایج آن اشاره شد، چنین نتیجه‌ای منطقی به نظر می‌رسد. علی‌رغم پایین بودن کیفیت خاک‌های مورد بررسی مقادیر شاخص Sgi در این تحقیق بالا بود و تقریباً اکثر آنها محدودیتی نداشتند. اگرچه امامی و همکاران (1387 و 1386) و دکستر (2004) بین پارامترهای مرتبط با ساختمان خاک مثل کربن آلی و شاخص Sgi همبستگی مثبت و جرم مخصوص ظاهری و شاخص Sgi رابطه معکوسی پیدا کرده‌اند و در این تحقیق نیز روابط مشابهی به دست آمد اما به نظر می‌رسد عوامل دیگری از قبیل آهک، توزیع اندازه ذرات خاک و اکسیدهای آهن و آلومینیوم بر شاخص Sgi تأثیر گذار

برخی از ویژگی‌های خاک مثل درصد کربن آلی را از طریق اضافه نمودن کودهای دامی و برگرداندن بقایای گیاهی به خاک می‌توان در طولانی مدت افزایش داد. چنین راهکاری سبب بهبود ساختمان خاک، کاهش جرم مخصوص ظاهری، افزایش تخلخل تهویه‌ای و آب قابل استفاده گیاهان نیز می‌گردد. همچنین کاهش عملیات شخم‌ورزی و تردد ماشین آلات کشاورزی نیز سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شود. علاوه بر این با آنکه در این مناطق کمبود آب یک محدودیت است، ولی استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری مثل آبیاری قطره‌ای و یا آبیاری در ساعات نزدیک به غروب آفتاب، سبب کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود و هم سبب استفاده بهینه از منابع آب کم موجود در این مناطق شده و هم محدودیت آب قابل استفاده گیاه را تا حدی برطرف می‌کند.

علاوه بر این بین مقادیر شاخص پایداری و رتبه تجمعی همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت ($r = 0.649$) که در شکل 1 نشان داده شده است. نتایج مشابهی توسط شهاب آرخازلو و همکاران (1390) و سینگ و خرا (2009) گزارش شده است. البته با اینکه ضریب همبستگی دو روش نسبتاً بالا و معنی‌دار است، ولی مقدار $R^2 (0/42)$ نسبتاً پایین است. بنابراین با توجه به هدف مطالعه می‌توان از هر کدام از این دو روش استفاده نمود. اگر هدف پایش کیفیت خاک و تولید محصول حداکثر در کاربری کشاورزی باشد، چون در روش رتبه تجمعی از پارامترهای بیشتر و مؤثرتری برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده می‌شود این روش توصیه می‌گردد و چنانچه پارامترهای کمتری برای ارزیابی کیفیت خاک وجود داشته باشند، می‌توان از روش شاخص پایداری برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده نمود.

معنی‌داری در سطح یک درصد وجود داشت که نتایج آن در جدول 4 ارائه شده است.

بر اساس روش رتبه تجمعی، مهم‌ترین عوامل محدود کننده وضعیت پایداری در مناطق مورد مطالعه به ترتیب pH، آب قابل استفاده گیاه، MWD و کربن آلی خاک بودند. با توجه به تأثیر pH بر شکل قابل استفاده عناصر غذایی و محدودیت جذب عناصر کم مصرف و فسفر استفاده از روش‌های مناسب کوددهی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به محدودیت آب قابل استفاده گیاه در این خاک‌ها اعمال روش‌های مناسب آبیاری و وجود آب کافی برای رشد گیاهان اجتناب ناپذیر است. البته این امر می‌تواند به کاهش شوری و حتی سدیم خاک نیز کمک نماید. همچنین همان گونه که نتایج نشان داد کربن آلی نیز یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایداری خاک بود که فقر کربن آلی در مناطق خشک و نیمه خشک به چشم می‌خورد، به طور کلی با آنکه نقش ویژگی‌های ارائه شده در جدول 1 در ایجاد محدودیت در مناطق خشک و نیمه خشک شناخته شده است، اما به کمک روش رتبه تجمعی، می‌توان پایدار یا غیرپایدار بودن منابع خاک را ارزیابی نمود، زیرا ممکن است برآیند ویژگی‌های این مناطق (جدول 1) منجر به پایداری منابع خاک شوند. از سوی دیگر با تعیین فاکتور وزنی نسبی می‌توان تمام ویژگی‌ها را با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار داد و مشخص نمود که کدام پارامتر یا پارامترها سبب غیرپایدار بودن و تخریب منابع خاک و کاهش تولید محصول می‌شوند، و با شناخت آنها می‌توان با اعمال مدیریت مناسب در دراز مدت و با در نظر گرفتن شرایط زیست محیطی شرایط را برای پایداری منابع خاک فراهم نمود. اگرچه برخی از ویژگی‌های خاک مثل pH را به خاطر خاصیت بافری خاک به راحتی نمی‌توان تغییر داد، ولی



شکل 1- رابطه بین شاخص پایداری و رتبه تجمعی در خاک‌های مورد مطالعه

جدول 1- حدود بحرانی و فاکتور وزنی نسبی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در روش رتبه تجمعی

RFC	pH	EC (dS m ⁻¹)	بافت	Bd (Mg M ⁻³)	MWD (mm)	OC (Mg ha ⁻¹)	SAR	شاخص Sgi	AWC (cm ³ cm ⁻³)	Fa (cm ³ cm ⁻³)	RWF	محدودیت
0/6-0/7	6-7	<3	Loam	< 1/3	>2/5	70-130	3 <	>0/050	>0/30	>0/20	1	بدون محدودیت
0/6-0/5 و 0/7-0/75	5/8-6 و 7/4	3-5	SiL, Si, SiCL	1/3-1/4	2-2/5	45-70	3-6	0/042-0/050	0/20-0/30	0/18-0/20	2	محدودیت کم
0/5-0/4 و 0/75-0/8	5/4-5/8 و 7/4-7/8	5-7	CL, SL	1/4-1/5	1-2	14-45	6-12	0/035-0/042	0/08-0/20	0/15-0/18	3	محدودیت متوسط
0/4-0/35 و 0/8-0/9	5/0-5/4 و 7/8-8/2	7-10	SiC, LS	1/5-1/6	0/5-1	7/5-14	12-20	0/035-0/020	0/02-0/08	0/10-0/15	4	محدودیت زیاد
< 0/35 و >0/9	>8/2 و < 5/0	>10	C,S	>1/6	< 0/5	< 7/5	> 20	< 0/020	< 0/02	< 0/10	5	محدودیت شدید

RWF: فاکتور وزنی نسبی، Fa: تخلخل تهویه‌ای، AWC: آب قابل استفاده گیاه، شاخص Sgi: شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف، SAR: نسبت جذب سدیم، OC: درصد کربن آلی خاک و MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر، Bd: جرم مخصوص ظاهری خاک، EC: هدایت الکتریکی عصاره‌ی اشباع خاک، RFC: رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نسبی

جدول 2- پایداری خاک بر اساس شاخص رتبه تجمعی با توجه به 11 ویژگی خاک

CR	RWF	وضعیت پایداری
< 20	1	خیلی پایدار
20-25	2	پایدار
25-30	3	پایدار با اضافه کردن نهاده‌های بیشتر
30-40	4	پایدار برای کاربری دیگر
>40	5	ناپایدار

جدول 3- ضرایب همبستگی بین شاخص پایداری و پارامترهای موثر بر آن

	Bd (gcm ⁻³)	OC (%)	Sgi	Fa (cm ³ cm ⁻³)	AWC (cm ³ cm ⁻³)	MWD (mm)	SI
Bd (gcm ⁻³)	-	-0/860**	-0/816**	-0/868**	-0/897**	-0/45**	-0/875**
OC (%)	-	-	0/842**	0/843**	0/863**	0/56**	0/941**
Sgi	-	-	-	0/874**	0/861**	0/407**	0/900**
Fa (cm ³ cm ⁻³)	-	-	-	-	0/843**	0/438**	0/895**
AWC (cm ³ cm ⁻³)	-	-	-	-	-	0/447**	0/911**
MWD (mm)	-	-	-	-	-	-	0/697**

** : معنی دار در سطح یک درصد

جدول 4- ضرایب همبستگی بین CR نهایی و پارامترهای موثر بر آن

	Bd (gcm ⁻³)	OC (%)	Sgi	Fa (cm ³ cm ⁻³)	AWC (cm ³ cm ⁻³)	MWD (mm)	SAR	EC	pH	RFC	CR
Bd (gcm ⁻³)	-	-0/860**	-0/816**	-0/868**	-0/897**	-0/45**	0/048 ^{ns}	0/087 ^{ns}	-0/036 ^{ns}	0/151 ^{ns}	0/574**
OC (%)	-	-	0/842**	0/843**	0/863**	0/56**	-0/137 ^{ns}	-0/202*	0/116 ^{ns}	-0/161 ^{ns}	-0/640**
Sgi	-	-	-	0/874**	0/861**	0/407**	-0/030 ^{ns}	-0/061 ^{ns}	0/020 ^{ns}	-0/385**	-0/469**
Fa (cm ³ cm ⁻³)	-	-	-	-	0/843**	0/438**	-0/119 ^{ns}	-0/148 ^{ns}	0/052 ^{ns}	-0/302**	-0/601**
AWC (cm ³ cm ⁻³)	-	-	-	-	-	0/447**	-0/004 ^{ns}	-0/084 ^{ns}	0/042 ^{ns}	-0/179*	-0/538**
MWD	-	-	-	-	-	-	-0/220**	-0/300**	0/243**	0/161 ^{ns}	-0/559**
SAR	-	-	-	-	-	-	-	0/693**	-0/178*	0/283**	0/610**
EC	-	-	-	-	-	-	-	-	-0/382**	-0/028 ^{ns}	0/614**
pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0/253**	-0/141 ^{ns}
RFC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0/156 ^{ns}

فهرست منابع:

1. امامی، ح، شرفا، م، نیشابوری، م.ر. و لیاقت، ع.ا. 1387. برآورد شاخص کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک در تعدادی از خاکهای شور و آهکی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. 39 (1): 39-46.
2. امامی، ح، نیشابوری، م.ر، شرفا، م. و لیاقت، ع.ا. 1386. تعیین شاخص کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از پارامترهای معادله ون‌گن‌اختن و توابع انتقالی در تعدادی از خاکهای آهکی و شور سدیمی. دهمین کنگره علوم خاک ایران. کرج، ایران.
3. بای بوردی، م. 1379. اصول مهندسی آبیاری، رابطه آب و خاک. جلد اول. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ هفتم. ص 709.
4. برزگر، ع.ا. 1380. مبانی فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران. چاپ اول. ص 252.
5. سالاردینی، ع.ا. 1374. حاصلخیزی خاک. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ پنجم. ص 440.
6. شهاب آرخالو، ح، حق نیا، غ.ح، امامی، ح. و کریمی کارویه، ع.ر. 1390. بررسی تاثیر شاخص‌های کیفیت خاک بر فرسایش‌پذیری خاک‌های کشاورزی و مرتع. دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. تبریز، ایران.
7. علیزاده، ا. 1380. رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات آستان قدس رضوی. چاپ دوم. ص 353.
8. Allmaras, R.R., V.A. Fritz., F.L. PFLEGER., and S.M. Copeland. 2002. Impaired internal drainage and *Aphanomyces euteiches* root rot of pea caused by soil compaction in a fine-textured soil. *Soil and Tillage Research*. 1740:1-12.
9. Deneff, K., J. Six., H. Bossuyt., S.D. Frey., E.T. Elliott., R. Merckx., and K. Paustian. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology Biochemi*. 33:1599-1611.
10. Dexter A.R. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214.
11. Drury, C.F., T.Q. Zhang, and B.D. Kay. 2003. The non-limiting and least limiting water range for soil nitrogen mineralization. *Soil Science Society of America Journal*. 67:1388-1404.
12. Gomez A.A., D.E.S. Kelly, J.K. Syers, and K.J. Coughlan. 1996. Measuring sustainability of agricultural systems at farm level, pp. 401-410. In: Doran J.W. and Jones A.J., Eds. *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publication Number 49, Soil Science Society of America, INC., Madison, WI.
13. 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 & Tillage Research*, 87:163-174.
14. Gregorich, E.G., Carter, M.R., Doran, J.W., Pankhurst, C.E., and Dwyer, L.M. 1997. Biological attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*. New York, NY, pp. 81-114.
15. Lal R. 1994. *Soil Methods and guidelines for Sustainable use of soil and water resources in the tropics*. Soil Management Support System, USDA,-NRCS. Washington, DC.
16. Lal, R., 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. *Soil & Tillage Research*, 27:1-8.
17. Lal, R., D. Mokma, and B. Lowery. 1999. Relation between soil quality and erosion, pp. 237-258, In: R. Lal, (ed.), *Soil quality and soil erosion*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IO.

18. Reynolds W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox, and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263.
19. Reynolds, W.D., B.T. Bowman., C.F. Drury., C.S. Tan., and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*. 110:131-146.
20. Shukla M.K., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. Soil quality indicators for reclaimed mine soils in southeastern Ohio. *Soil Sci.* 169:133–142.
21. Shukla, M.K., Lal, R., Ebinger, M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research*, 87:194–204.
22. Silva, A.P., and B.D. Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil*. 184: 323-329.
23. Singh M.J. and K.L. Khera. 2009. Physical indicators of soil quality in relation to soil erodibility under different land uses. *Arid Land Research and Management*, 23:152-167.
24. Topp, G.C., W.D. Reynolds., F.J. Cook., J.M. Kirby., and M.R. Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science*. 25: 21– 58.
25. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892–898.
26. Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R. 1990. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of the Unsaturated Soils. Res. Rep. 6002-91065. USEPA, Ada, OK.
27. Wallace, A., and R.E. Terry. 1998. Soil conditioners, soil quality and soil sustainability. In: Wallace, A., Terry, R.E. (Eds.), *Handbook of Soil Conditioners*. Marcel Dekker, New York, NY, pp. 1 – 41.