

مقایسه روش‌های ارزیابی پایداری خاکدانه به‌عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

سعید سعادت^۱ - لیلا اسمعیل نژاد^{۲*} - حامد رضایی^۳ - رسول میرخانی^۴ - جواد سیدمحمدی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

چکیده

پایداری خاکدانه، توانایی خاک در نگهداری و حفظ ترتیب فاز جامد و فضای خلل و فرج بعد از اعمال تنش‌های مکانیکی است. گرچه تاکنون یک روش رضایت‌بخش جامع برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک ارائه نشده است ولی پایداری خاکدانه می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک قلمداد شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی روش‌های مناسب و استاندارد تعیین پایداری خاکدانه است که قادر به تشخیص شرایط کیفی فیزیکی خاک‌های دارای بافت متوسط در هر دو منطقه خشک و مرطوب باشد. تعداد ۱۲۰ نمونه خاک که شصت نمونه مربوط به منطقه مرطوب گیلان و شصت نمونه دیگر از استان فارس با اقلیم خشک انتخاب شدند. هر ۱۰ نمونه خاک با بافت مشابه مخلوط شده و در نهایت یک نمونه خاک تعیین شد. بعد از هوا خشک شدن و الک کردن نمونه‌ها، تعیین بافت به‌روش پیپت و کربن‌آلی خاک به‌روش اکسیداسیون انجام گرفت. همچنین نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی جهت تعیین ضریب آب‌گذری اشباع، منحنی رطوبتی و جرم مخصوص ظاهری خاک برداشته شد. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع به‌روش بار ثابت صورت گرفت. برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه، از روش‌های کمپر-رزنا، لایبسونوایس، و دی‌لینهر-دی‌بودت استفاده شد. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در روش‌های کمپر-رزنا و لایبسونوایس برای مطالعه پایداری ساختمان در هر دو اقلیم مناسب هستند. اگر یک روش بررسی سریع و ساده از وضعیت ساختمان خاک مورد نیاز باشد، تست‌های ساده مثل کمپر-رزنا با اشباع سریع و همچنین لایبسونوایس در حالت مرطوب شدن سریع می‌توانند مورد استفاده واقع شوند.

واژه‌های کلیدی: دی‌لینهر-دی‌بودت، لایبسونوایس، ساختمان خاک، کمپر-رزنا، شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

مقدمه

شدن^۲ خاکدانه توسط روش‌های کدورت‌سنجی^۳ (۱۶)، (۲) ارزیابی مقاومت خاکدانه تحت تأثیر انرژی قطرات آب (۶)، (۳) بررسی توزیع اندازه خاکدانه و پایداری آن به‌وسیله الک تر (۴۶)، روش‌های متعدد دیگری مبتنی بر روش الک تر، توسعه یافته‌اند که در یک یا چند مورد زیر با هم تفاوت دارند (۲۵): (۱) روش‌های قبل از مرطوب شدن (۵)، (۲) اندازه خاکدانه‌های مورد استفاده (۳۱)، (۳) استفاده از یک الک منفرد یا سری الک‌ها (۵، ۱۰ و ۲۵) و تفاوت در شدت انرژی مکانیکی مخرب وارد شده به نمونه‌ها (۱)، (۴) تفاوت در مایع به‌کار رفته جهت غوطه‌وری خاکدانه‌ها (۲۰ و ۲۵). موارد ذکر شده باعث می‌شوند که مقایسه پایداری حاصل از روش‌های متفاوت سخت شود. علاوه بر این هر روش، بیان متفاوتی از پایداری خاکدانه داشته که باعث پیچیدگی مقایسه نتایج آن‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال برخی روش‌ها نتایج را براساس درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA^۴)، بعضی

پایداری خاکدانه، توانایی خاک در نگهداری و حفظ ترتیب فاز جامد و فضای خلل و فرج بعد از اعمال تنش‌های مکانیکی یا نیروهای مخرب است (۱۵). هنگامی که تنش‌های اعمال شده بیش از نیروهای پیوندی است، خاکدانه‌های ضعیف شکسته شده و تخریب ساختمان خاک را به دنبال دارد (۲ و ۲۲). روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه وجود دارد که اساس آن‌ها بر خرد شدن نمونه‌های خاکدانه پس از اعمال تنش‌های مکانیکی است (۱). طبق نظر لال و شوکلا (۲۰۰۴)، روش‌های ارزیابی پایداری ساختمان خاک را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد (۲۴): (۱) بررسی سهولت پخشیده

۱، ۳ و ۴- اعضای هیأت علمی بخش اصلاح خاک و مدیریت پایدار اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
۲ و ۵- محققین مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

*- نویسنده مسئول: (Email: Esmaeelnejad.leila@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v33i2.73916

2- Ease of dispersion
3- Turbidimetry
4- Water stable aggregate

ویژگی‌های این خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. نمونه‌برداری از لایه سطحی ۰-۲۰ سانتی‌متری صورت گرفت. بعد از هوا خشک شدن و الک کردن نمونه‌ها، تعیین بافت به روش پیپت، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون و پایداری خاکدانه نیز به روش‌های گوناگونی که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد در سه تکرار انجام گرفت (۴۰).

همچنین نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های فلزی (با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) از لایه ۱۵-۵ سانتی‌متری خاک جهت تعیین ضریب آب‌گذری اشباع، منحنی رطوبتی و جرم مخصوص ظاهری خاک برداشته شد. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت صورت گرفت. منحنی رطوبتی خاک نیز بر اساس اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در هفت مکش ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال ترسیم شد. جرم مخصوص ظاهری خاک خشک در پتانسیل ماتریک ۱۰- کیلو پاسکال تعیین شد. با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی شاخص‌های ظرفیت تهویه (AC)، آب قابل استفاده گیاه (PAWC)^۴ و مقدار نسبی رطوبت (RWC)^۵ (۲۸) تعیین شدند:

$$AC = \theta_{h-0cm} - \theta_{h-100cm} \quad (1)$$

$$PAWC = \theta_{h-300cm} - \theta_{h-15000cm} \quad (2)$$

$$RWC = \theta_{h-300cm} / \theta_{h-0cm} \quad (3)$$

در معادلات فوق‌الذکر، θ_{h-0cm} ، $\theta_{h-100cm}$ ، $\theta_{h-300cm}$ و $\theta_{h-15000cm}$ به ترتیب مقادیر رطوبت در مکش‌های ۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر می‌باشد.

برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها از نمونه‌های هوا خشک استفاده شد. به این منظور از سه روش متفاوت (۱) روش دی‌لین‌هر و دی‌بودت (۱۰) که بر اساس الک تر و با استفاده از الک‌های مضاعف انجام شد، (۲) روش لی‌بیزسونایس (۲۵) و (۳) و روش کمپر و رزنا (۲۳) به‌وسیله یک الک تر انجام شد. در روش دی‌لین‌هر و دی‌بودت ابتدا نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. سپس ۲۰ گرم از خاک الک شده یک بار به‌صورت رطوبت هوا خشک (پیش تیمار مرطوب کردن سریع) و بار دیگر با رطوبت گنجایش (پیش تیمار مرطوب کردن آهسته) بر روی یک سری الک به ترتیب از بالا به پایین (۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۰۵ میلی‌متر) ریخته شد و با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و زمان ۵ دقیقه تحت الک تر قرار گرفت. روش لی‌بیزسونایس شامل سه مرحله است: (۱) خیس کردن خاکدانه‌ها، (۲) غربال کردن آن‌ها در اتانول ۹۶ درصد، و (۳) جمع‌آوری مواد به جا مانده بر روی غربال ۰/۰۵ میلی‌متری. خشک کردن آن و غربال کردن آن‌ها با سری الک‌های ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱ میلی‌متر است.

دیگر بر حسب میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD^۱) و تعدادی هم به‌صورت شاخص پایداری (SI^۲) ارائه می‌دهند که همین امر مقایسه آن‌ها را مبهم می‌کند. البته روش‌های ساده‌ای مثل ارزیابی بصری ساختمان خاک (۲۸) تا روش‌های پیشرفته لیزری و امواج صوتی (۳۶) نیز توسعه یافته‌اند.

در این تحقیق تمرکز بر ارزیابی روش‌های استاندارد اندازه‌گیری خاکدانه‌های پایدار در آب به‌وسیله الک کردن می‌باشد. اگرچه یک روش مشخص، رضایت‌بخش و جامع برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک ارائه نشده است، ولی پایداری خاکدانه به‌عنوان یک ویژگی فیزیکی مهم در تعیین کیفیت فیزیکی خاک کاربرد وسیعی دارد (۳) و (۳۴). البته چندین شاخص دیگر نیز وجود دارند که به‌طور غیرمستقیم به‌عنوان شاخص‌های کیفیت فیزیکی ساختمان خاک کاربرد دارند. به‌عنوان مثال رابطه بین توزیع اندازه ذرات و مواد آلی خاک (۲۳)، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، تخلخل تهویه‌ای، رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه و مقدار آب قابل استفاده گیاه (۳۵) و (۳۶). برخی از این ویژگی‌ها به‌خوبی با شاخص S که توسط دکستر (۱۲) پیشنهاد شده ارتباط دارند که یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک تلقی می‌شود (۱۱). در اکثر خاک‌ها، مقادیر بزرگ‌تر S حاکی از وجود میکروساختارهای خوب توسعه یافته‌اند. کارایی شاخص S در بیان کیفیت خاک در مطالعات قبلی دکستر (۱۲، ۱۳ و ۱۴) نشان داده شده است.

هدف از این مطالعه ارزیابی روش‌های اندازه‌گیری پایداری خاکدانه است که قادر به تعیین شرایط کیفی فیزیکی خاک‌های میان بافت در دو منطقه خشک و مرطوب باشد. علاوه بر این ارزیابی روش‌های منتخب از طریق مقایسه آن‌ها با سایر شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک با هدف استفاده از پایداری خاکدانه به‌عنوان یک شاخص قابل اطمینان از وضعیت ساختمان خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تجزیه خاک

تعداد ۱۲۰ نمونه خاک که شصت نمونه مربوط به منطقه مرطوب و از سطح استان گیلان با اقلیم خیلی مرطوب با میانگین بارندگی سالانه ۱۲۸۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد و شصت نمونه دیگر از سطح استان فارس با اقلیم خشک و میانگین بارندگی سالانه ۲۲۵ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۲۷ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان منطقه خشک انتخاب شدند. هر ۱۰ نمونه خاک با بافت مشابه مخلوط شده و در نهایت یک نمونه خاک تعیین شد.

3- Air capacity

4- Plant available water capacity

5- Relative water content

1- Mean weight diameter

2- Stability index

جدول ۱- ویژگی خاک‌های مورد مطالعه مناطق مرطوب گیلان (G1-G6) و خشک استان فارس (F1-F6)
 Table 1- Studied soil properties of Guilan moist regions (G1-G6) and Fars arid regions (F1-F6)

خاک Soil	کلاس بافت Texture class	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	کربن آلی Organic carbon
G1	لوم رسی شنی SCL	285.2	198.6	516.2	42.6
G2	لوم رسی CL	291	282.3	426.7	24.4
G3	لومی L	172.8	350.7	476.5	17.5
G4	لومی L	229.5	485.8	284.7	20.3
G5	لوم سیلتی SiL	261	583	156	29.1
G6	رسی سیلتی SiC	423.1	501.3	75.6	16.1
F1	لوم شنی SL	136.5	119.6	743.9	10.6
F2	لوم سیلتی SiL	164.5	627.9	207.6	10.4
F3	لوم سیلتی SiL	125.4	657.7	216.9	9.4
F4	لومی L	97.7	531.8	370.5	9.6
F5	لومی L	153	371.8	475.2	8.1
F6	لوم سیلتی SiL	101.3	519	379.7	6.5

خیلی خوب، ۰/۸-۰/۶۶ خوب، ۰/۵-۰/۶۶ نامناسب و کمتر از ۰/۵ حاکی از کلاس پایداری بد است (۹).

روش لی‌بیزسونایس (۲۴)، که در اینجا به اختصار LB نشان داده می‌شود، دارای سه تیمار مختلف است که بیانگر حالت‌های مختلف مرطوب شدن است: مرطوب شدن سریع (LB1)، مرطوب شدن آرام (LB2)، پیش تیمار مرطوب شدن و سپس شکستگی مکانیکی خاکدانه‌ها به‌وسیله تکان دادن (LB3). پایداری خاکدانه حاصل از سه روش فوق به‌صورت محاسبه MWD و SI بیان می‌شوند. لی‌بیزسونایس (۲۴)، بر اساس مقادیر MWD حاصل از تیمارهای فوق‌الذکر کلاس‌های پایداری زیر را بیان کرده است: اگر MWD بیشتر از ۲ باشد خیلی پایدار، ۲-۱/۳ پایدار، ۱/۳-۰/۸ متوسط، ۰/۸-۰/۴ ناپایدار و کمتر از ۰/۴ خیلی ناپایدار است.

روش Yoder که به‌وسیله کمپر و رزنا (۲۳) تعدیل و اصلاح شده است و در اینجا با علامت اختصاری KR نمایش داده می‌شود، برای اندازه‌گیری خاکدانه‌های هوا خشک ۲-۱ میلی‌متری به کار رفت. روش مذکور مبتنی بر الک کردن خاکدانه‌ها در آب است. بدین منظور ۲۰ گرم خاکدانه هوا خشک در الک ۰/۲۵ میلی‌متری ریخته شده و برای اشباع کردن تدریجی آن‌ها در داخل دسیکاتور و پتانسیل ماتریک ۳- سانتی‌متر به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. پس از اشباع شدن آرام (SW) و سریع (FW)، الک ۰/۲۵ میلی‌متری در درون دستگاه الک تر قرار گرفته و به مدت ۳ دقیقه در یک سرعت ثابت و کنترل شده (۳۰ نوسان در دقیقه) در آب مقطر الک شد. در این روش، WSA به‌عنوان ملاک پایداری برابر با نسبت وزن خاکدانه‌های متلاشی نشده به وزن اولیه آن‌ها پس از کسر شن بزرگتر از ۰/۲۵ میلی‌متر است. سپس

MWD از مقدار خاکدانه باقی‌مانده بر روی هر الک محاسبه و معمولاً بر حسب میلی‌متر بیان می‌شود. روش کمپر و رزنا (۲۳) مبتنی بر غربال کردن خاکدانه‌ها در آب است. برای این منظور ۲۰ گرم خاکدانه هوا خشک در غربال ۰/۲۵ میلی‌متری با قطر دهانه ۶ سانتی‌متر ریخته شد و برای اشباع کردن تدریجی در داخل دسیکاتور قرار گرفت. پس از اشباع غربال ۰/۲۵ میلی‌متر داخل دستگاه غربال تر که مخصوص اندازه‌گیری این نمایه بود، قرار داده شد. مدت غربال کردن خاکدانه‌ها در آب مقطر پنج دقیقه، ارتفاع نوسان یک سانتی‌متر و شدت آن ۳۰ نوسان در دقیقه انتخاب شد. در این روش WSA به‌عنوان ملاک پایداری برابر با نسبت وزن خاکدانه‌های متلاشی نشده به وزن اولیه آن‌ها پس از کسر شن بزرگتر از ۰/۲۵ میلی‌متر است. نتیجه به‌صورت درصد خاکدانه‌های پایدار بیان می‌شود.

همه تجزیه‌ها در سه تکرار صورت گرفت. در روش دی‌لین هر و دی‌بودت (۱۰) که در اینجا به اختصار dLdB نامیده می‌شود، نتایج بر حسب MWD بیان می‌شود. شاخص ناپایداری^۱ (IS)، بر اساس تفاوت بین MWD اولیه (الک خشک) و MWD نهایی (الک تر) قابل محاسبه است. معکوس IS شاخص پایداری یا SI است که مقیاسی از پایداری خاکدانه‌ها است (SI=1/IS). دی‌لین هر و دی‌بودت (۹)، برای خاک‌های متوسط بافت بلژیک بر اساس SI طبقه‌بندی زیر را ارائه کرده‌اند: SI بیشتر از یک نشان‌دهنده پایداری عالی، ۰/۸-۱

1- Instability index

تجزیه آماری داده‌ها

جهت بررسی تفاوت‌های آماری بین روش‌های گوناگون، مقایسه میانگین از طریق آزمون LSD و برای تعیین میزان تغییرپذیری یا همگنی روش‌ها از آزمون تعیین همگنی Levene استفاده شد. میزان شباهت بین روش‌ها به صورت مقیاس‌بندی چند بعدی با استفاده از روش ALSCAL در نرم‌افزار SPSS بر روی داده‌های استاندارد شده انجام شد. در این روش داده‌ها بر اساس تشابهات یا تفاوت‌هایشان دسته‌بندی، رتبه‌بندی و ترجیح داده می‌شوند. سپس تشابهات موجود را به شکل نقاطی در یک فضای چند بعدی در آورده و آن‌ها را به گونه‌ای پیکربندی می‌کند که حداکثر تطابق را داشته باشند. از ماتریس همبستگی Spearman Rho جهت بیان عددی درجه همبستگی بین شاخص‌های پایداری روش‌های مختلف استفاده شد. این عملیات نیز در نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

برای نمایش داده‌های پایداری خاکدانه‌ها با یک شاخص مشترک، نتایج حاصل از سه روش ذکر شده در مواد و روش‌ها بر حسب MWD بیان شدند. البته بر اساس روش به کار رفته در بعضی موارد مقادیر WSA و SI نیز آورده شده است (جدول ۲). تفاوت MWD اولیه و نهایی نشانگر مقایسه وضعیت خاکدانه‌ها پس از الک خشک و تر است. در مورد روش dLdB، مقدار MWD اولیه ۴/۴۵ میلی‌متر بود. خاک‌های G1، G2 و G5 کمتر از ۲۰ درصد کاهش MWD داشتند. خاک‌های G6 و F3 به میزان ۳۰-۴۰ درصد و سایر خاک‌ها بیش از ۵۰ درصد کاهش نسبت به MWD اولیه داشتند. کاهش بیشتر در مقدار MWD بیان کننده ناپایداری بیشتر و بنابراین شاخص SI کمتر است. خاک‌های G1، G2 و G5 دارای $SI_{dLdB} > 1$ و درجه پایداری عالی، F3 دارای درجه پایداری خاکدانه خوب با $SI_{dLdB} = 0/68$ و سایر خاک‌ها دارای شاخص پایداری پایین و $SI_{dLdB} < 0/66$ بودند.

همانطور که در شکل ۱ قسمت‌های الف و ب نشان داده شده است، بیش از ۷۰ درصد از خاکدانه‌های پایدار در آب خاک‌های G1، G2 و G3 دارای قطر ۲-۸ میلی‌متر و ۵۰-۷۰ درصد خاکدانه‌های خاک‌های G3، G6، F1، F2 و F3 دارای این قطر بودند. در مورد سایر خاک‌ها بیش از ۵۰ درصد جرمی خاکدانه‌های پایدار در آب، دارای قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر بودند. به‌طور کلی روش dLdB نشان داد که خاک‌های G1، G2، G3 و F3 خاک‌هایی با پایداری خاکدانه بیشتر و شرایط ساختمانی "خوب" هستند.

شکل ۲ توزیع اندازه خاکدانه‌ها پس از هر سه تیمار روش LB را نمایش می‌دهد. توزیع اندازه خاکدانه‌ها به‌وضوح متأثر از تیمارهای مورد استفاده بود. در خاک‌های مناطق مرطوب، خاک‌های G1، G2 و

MWD بر حسب WSA محاسبه می‌شود (۴):

$$MWD = \frac{W_s \cdot d}{W_t} \quad (4)$$

در آن: W_s همان WSA، d میانگین قطر خاکدانه‌ها و W_t وزن کل نمونه به کار رفته است.

در این مطالعه برای روش‌های dLdB و LB یک خاک خیلی پایدار، حاکی است که بیش از ۷۰ درصد خاکدانه‌های پایدار در آب آن، بر روی الک ۰/۵ میلی‌متر و بالاتر قرار گرفته باشد. این مقدار برای خاک ناپایدار کمتر از ۵۰ درصد است. در روش KR، خاک پایدار، حاکی است که بیش از ۷۰ درصد خاکدانه‌ها پس از الک تر، بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری قرار گیرد و در مورد خاک ناپایدار این رقم کمتر از ۵۰ درصد است.

همچنین از توزیع اندازه ذرات و مقدار کربن آلی خاک برای محاسبه شاخص پایداری ساختمانی (SI) استفاده شد. این شاخص به‌وسیله پی‌بری (۳۲) پیشنهاد شد و بیان کننده خطر تخریب ساختمان خاک ناشی از تخلیه کربن آلی خاک است:

$$SI = (1.72 \times SOC/clay + silt) \times 100 \quad (5)$$

در رابطه ۵ همه مقادیر بر حسب درصد است.

طبقه‌بندی ارائه شده توسط پی‌بری بر حسب SI بدین شرح است: اگر SI کمتر از ۵ درصد باشد نشان می‌دهد که خاک از لحاظ ساختمانی تخریب شده است، ۷-۵ درصد بیانگر خطر زیاد تخریب ساختمان خاک، ۹-۷ درصد خطر کم تخریب، بیش از ۹ درصد حاکی از وجود مقادیر کافی کربن آلی جهت ابقا و پایداری ساختمان خاک است.

با استفاده از نرم افزار RETC معادله ونگنختن (۴۳) بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی برازش داده شد و پارامترهای آن مشخص شدند.

$$\theta_h = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (6)$$

که در آن θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت اشباع و باقی‌مانده (بر اساس کیلوگرم بر کیلوگرم)، h مکش بر حسب سانتی‌متر، α ، n و m نیز پارامترهای شکل منحنی هستند. معادله زیر جهت محاسبه شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف منحنی رطوبتی، S-Index، به کار رفت:

$$S = \left| -n(\theta_s - \theta_r) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right] \left(\frac{1}{n} - 2 \right) \right| \quad (7)$$

با توجه به اینکه مقدار شاخص S همواره منفی است، لذا از قدر مطلق آن استفاده می‌شود. بر اساس S، این طبقه‌بندی ارائه شده است (۱۳): اگر S بیش از ۰/۳۵ باشد شاخص کیفیت فیزیکی خاک خوب است، ۰/۳۵-۰/۲ ضعیف و کمتر از ۰/۲ خیلی ضعیف می‌باشد.

۰/۱-۰/۵ میلی‌متر قرار گرفتند. بعد از تیمار LB₂ تخریب خاکدانه‌ها در خاک‌های F1 و F2 خیلی کم بود؛ به‌طوری‌که به‌ترتیب ۹۱ و ۸۲ درصد از خاکدانه‌ها بین الک‌های ۰/۵-۲ میلی‌متری قرار داشته که این وضعیت در خاک‌های F3، F4، F5 و F6 متفاوت بود. پس از اعمال تیمار LB₃ بیش از ۵۰ درصد از خاکدانه‌های خاک‌های F1، F3، F4، F5 و F6 دارای قطر ۰/۵-۲ میلی‌متر بوده، در حالی‌که در مورد خاک F2 بیش از ۵۰ درصد خاکدانه‌ها روی الک‌های ۰/۵-۲ میلی‌متر جمع شده بودند.

G5 بیشترین نسبت خاکدانه‌های ۲-۵ میلی‌متر را پس از هر سه تیمار LB داشتند. سایر خاک‌ها پس از تیمار LB₁ بیش از ۵۰ درصد جرمی خاکدانه‌ها در بین الک‌های ۰/۵-۰/۵ میلی‌متر قرار داشتند. همچنین پس از تیمارهای LB₂ و LB₃ ۴۰-۵۰ درصد از خاکدانه‌ها بین الک‌های ۰/۲-۰/۲ میلی‌متر قرار گرفتند. ر خاک‌های مناطق خشک (F1-F6)، روند توزیع اندازه خاکدانه‌ها در هر سه تیمار LB متفاوت از خاک‌های منطقه مرطوب بود. پس از اعمال تیمار LB₁، بیش از ۵۰ درصد جرمی خاکدانه‌ها بین الک‌های

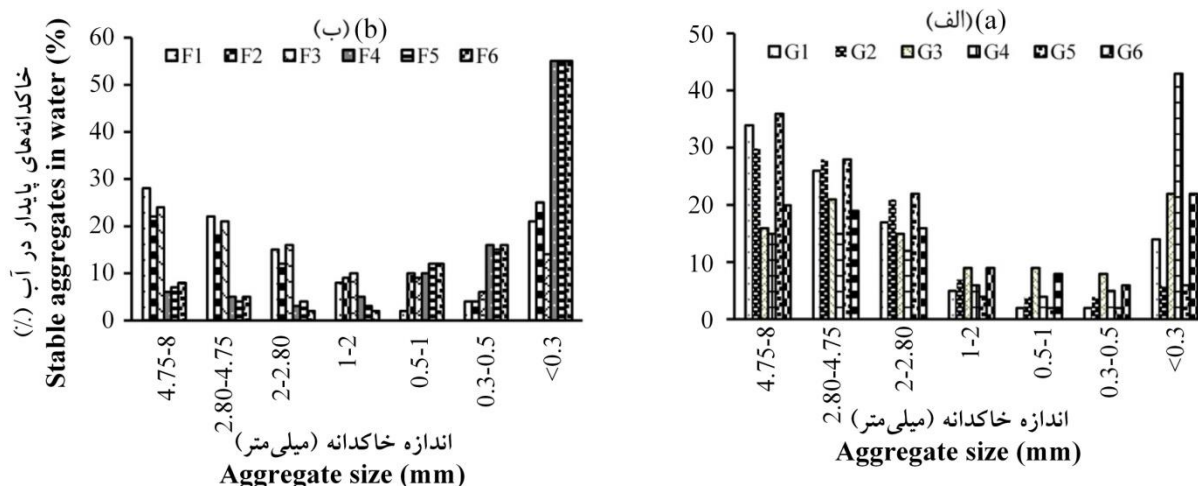
جدول ۲- میانگین مقادیر شاخص‌های پایداری در خاک‌های مورد مطالعه

Table 2- Mean values of stability indicators in studied soils

	G1	G2	G3	G4	G5	G6
MWD _{dLdB}	3.63(0.06)	3.58(0.15)	2.29(0.31)	1.93(0.70)	3.97(0.08)	(0.5)2.62
SI _{dLdB}	1.22(0.10)	1.15(0.21)	0.46(0.07)	0.40(0.15)	2.07(0.31)	0.55(0.16)
MWD _{LB1}	1.78(0.19)	1.86(0.22)	0.51(0.06)	0.79(0.33)	2.99(0.09)	0.93(0.17)
MWD _{LB2}	3.46(0.01)	3.37(0.05)	1.64(0.16)	1.99(0.44)	3.46(0.02)	1.89(0.33)
MWD _{LB3}	3.15(0.12)	3.18(0.06)	1.50(0.10)	1.82(0.43)	3.38(0.02)	1.99(0.34)
MWD _{KRFFW}	0.73(0.05)	0.61(0.07)	0.18(0.02)	0.42(0.11)	1.00(0.02)	0.58(0.07)
MWD _{KRSW}	1.02(0.03)	0.82(0.03)	0.77(0.05)	0.68(0.02)	1.01(0.02)	0.84(0.03)
WAS _{KRFFW}	70.8(4.67)	82.2(5.39)	37.1(4.37)	43.1(10.43)	93.4(1.47)	57.3(5.97)
WAS _{KRSW}	92.7(1.70)	99.3(0.42)	91.1(0.88)	68.9(0.87)	97.7(0.24)	83.6(0.24)
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
MWD _{dLdB}	2.11(0.22)	2.92(0.33)	2.92(0.33)	0.82(0.17)	0.75(0.21)	0.71(0.32)
SI _{dLdB}	0.43(0.04)	0.43(0.04)	0.66(0.14)	0.28(0.01)	0.26(0.03)	0.25(0.05)
MWD _{LB1}	0.73(0.10)	0.67(0.09)	0.53(0.07)	0.33(0.06)	0.34(0.12)	0.31(0.19)
MWD _{LB2}	3.25(0.05)	2.85(0.37)	1.60(0.17)	2.04(0.27)	2.00(0.04)	1.99(0.23)
MWD _{LB3}	0.65(0.08)	1.98(0.18)	0.71(0.03)	0.80(0.08)	0.72(0.16)	0.75(0.05)
MWD _{KRFFW}	0.46(0.10)	0.41(0.10)	0.40(0.08)	0.38(0.12)	0.32(0.21)	0.35(0.09)
MWD _{KRSW}	0.84(0.02)	0.90(0.17)	0.83(0.01)	0.76(0.04)	0.69(0.03)	0.71(0.02)
WAS _{KRFFW}	44.9(8.34)	37.9(9.95)	34.5(7.17)	39.6(11.46)	35.2(12.12)	34.9(8.18)
WAS _{KRSW}	82.3(1.00)	83.7(0.75)	77.2(0.62)	74.4(3.21)	69.6(0.21)	71.3(0.61)

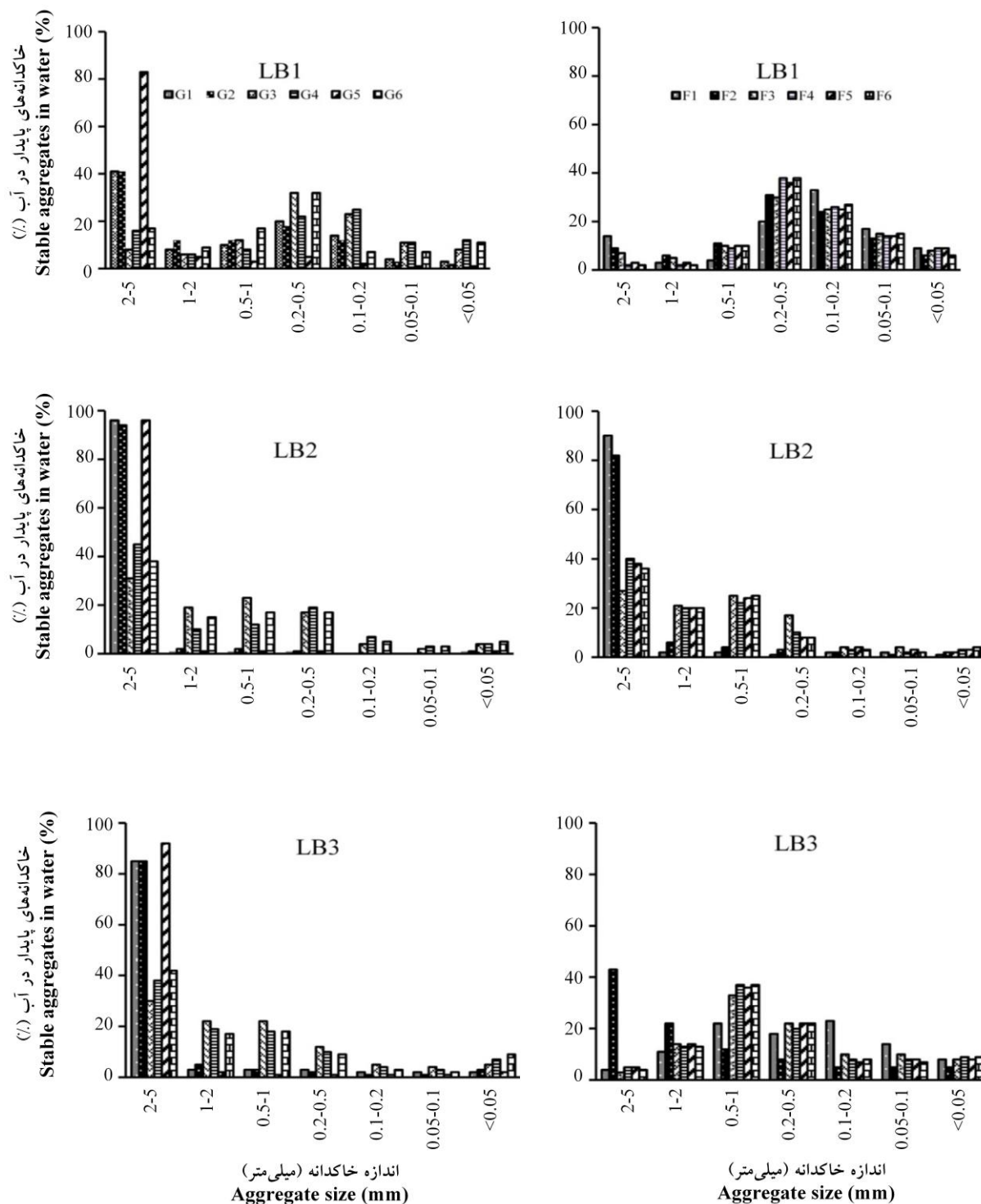
Values are presented in parentheses are standard deviation.

مقادیر داخل پرانتز انحراف معیار داده‌ها هستند.



شکل ۱- توزیع اندازه خاکدانه خاک‌ها، (الف): منطقه مرطوب (G1-G6)، (ب): منطقه خشک (F1-F6) بر اساس روش dLdB

Figure 1- Distribution of soils aggregate size, (a): moist region (G1-G6), (b): arid region (F1-F6) according to dLdB method



شکل ۲- توزیع اندازه خاکدانه بر اساس روش LB برای خاک‌های مناطق مرطوب (G1-G6) و خشک (F1-F6)
 Figure 2- Distribution of aggregate size according to LB method for moist region soils (G1-G6) and arid region (F1-F6)

G5 در کلاس خیلی پایدار، G1 و G2 پایدار، G6 متوسط و سایر خاک‌ها ناپایدار هستند. بر حسب MWD_{LB2} همه خاک‌ها در رده خیلی پایدار و پایدار قرار می‌گیرند و در نهایت طبق MWD_{LB3} در

این تفاوت‌ها بین تیمارهای LB، برای همه خاک‌ها به‌جز خاک‌های G6 و F1 به این شرح است: $MWD_{LB2} > MWD_{LB3} > MWD_{LB1}$ بر اساس MWD_{LB1} خاک

۳۰ دقیقه استفاده شد همه خاک‌ها پس از تکان خوردن در الک تر در کلاس خیلی پایدار قرار می‌گیرند. این مطلب حاکی از این است که پایداری خاکدانه خاک‌های متوسط بافت مورد مطالعه به‌شدت متأثر از مقدار رطوبت خاکدانه‌ها قبل از الک تر است.

تجزیه تفاوت بین ضرایب تغییرات روش‌های مختلف با هدف مقایسه تغییرپذیری در کلاس ارائه شده توسط روش‌های مختلف صورت گرفت (جدول ۳). طبق جدول ۳ در خاک‌های مناطق مرطوب دو گروه تشکیل شده است. KR_{FW} و LB_1 در یک گروه و LB_3 و LB_2 در یک گروه دیگر قرار دارند. به‌عبارتی بر طبق نتایج آزمون Levene، روش‌هایی که دارای همگنی ضریب تغییرات بودند در یک گروه قرار گرفته‌اند که حاکی از مشابه بودن نتایج روش‌ها در کلاس‌بندی کیفیت خاک‌های مورد مطالعه است. روش‌هایی که بر پایه مرطوب شدن آرام هستند یعنی LB_2 و KR_{SW} در دو گروه مجزا از هم قرار گرفته‌اند. این تفاوت در گروه‌بندی مؤید این مطلب است که فرآیند به‌کار رفته در هر روش خاکدانه‌ها را با شدت متفاوتی تخریب می‌کنند. در مورد روش‌های $dLdB$ ، KR_{FW} و LB_1 و LB_3 انرژی وارد شده بر خاکدانه‌ها توسط تکان دادن، مخرب‌تر از روش‌هایی است که قبل از اعمال الک تر از پیش تیمار مرطوب شدن آرام استفاده می‌کنند. هر دو روش تعیین MWD_{LB_2} و MWD_{KRSW} با حذف هوا از خاکدانه‌ها آغاز می‌شوند (پیش مرطوب شدن در یک ماتریک مشخص به‌وسیله آب و اتانول) قبل از اینکه انرژی به‌صورت دستی یا مکانیکی به خاکدانه‌ها وارد شود. ولی تفاوت ایجاد شده بین دو روش فوق‌الذکر می‌تواند به دلایل زیر باشد: (۱) روش LB_2 نسبت به KR دوره الک کوتاه‌تری دارد، (۲) غوطه‌وری خاکدانه‌ها در مایعات متفاوت برای الک تر و (۳) اندازه‌های مختلف خاکدانه‌های استفاده شده.

کلاس خیلی پایدار و پایدار قرار می‌گیرند به‌جز خاک‌های $F1$ ، $F3$ ، $F4$ که در گروه خاک‌های ناپایدار قرار می‌گیرند.

برای هر دو مورد خاک‌های مورد بررسی در مناطق خشک و مرطوب، در بین تمام روش‌های اندازه‌گیری پایداری خاکدانه، روش LB ، مقادیر MWD بیشتری ارائه داد که نشان می‌دهد این روش بیش از سایرین از فروپاشی و تخریب خاکدانه‌ها جلوگیری می‌کند. تفاوت در روند مشاهده شده از تیمارهای مختلف روش LB حاکی از این است که تیمار LB_2 خاک‌های بیشتری را در رده پایدار قرار می‌دهد؛ به‌طوری‌که خاک‌هایی که در اثر تیمارهای LB_1 و LB_3 کلاس ناپایدار داشتند در اثر LB_2 در کلاس پایدار قرار گرفتند.

نتایج حاصل از روش KR بر حسب WSA و MWD گزارش شده‌اند. با توجه به WSA ، پس از پیش تیمار مرطوب شدن سریع، کلاس‌های پایداری زیر قابل رویت است: خاک‌های $G1$ ، $G2$ و $G5$ خیلی پایدار، $G6$ پایدار و سایر خاک‌ها ناپایدار هستند (جدول ۲). کاهش MWD پس از مرطوب شدن سریع خاکدانه‌های ۱-۲ میلی‌متری برای خاک $G5$ ۳۰ درصد، خاک‌های $G1$ ، $G2$ و $G6$ ۶۰-۵۰ درصد و بیش از ۷۰ درصد برای سایر خاک‌ها می‌باشد. مقایسه کاهش MWD این روش با روش‌های قبلی نشان می‌دهد به‌جز خاک $G5$ هنگامی که الک تر پس از پیش تیمار مرطوب شدن سریع خاکدانه‌ها صورت می‌گیرد که خاکدانه‌های ۱-۲ میلی‌متری مقاومت و پایداری کمتری دارند. جدول ۲ نشان می‌دهد هنگامی که پیش تیمار مرطوب شدن آرام بر روی خاکدانه‌ها اعمال می‌شود، همه خاک‌ها خیلی پایدار هستند و ۷۰-۵۰ درصد از خاکدانه‌ها پس از الک کردن باقی می‌مانند. نتایج نشان‌دهنده کاهش کمتر از ۳۰ درصد تیمار مرطوب شدن آرام در پتانسیل ماتریک ۳- سانتی‌متری به مدت

جدول ۳- آماره‌های شاخص‌های پایداری مربوط به خاک‌های مناطق مرطوب و خشک
Table 3- The statistics of stability indicators of moist and arid regions soils

روش‌ها Methods	شاخص Indices	نام اختصاری Abbreviations	خاک‌های مرطوب Moist soils					خاک‌های خشک Arid soils				
			میانگین Mean	انحراف معیار St. Dev.	ضریب تغییرات* CV	کمینه Min	بیشینه Max	میانگین Mean	انحراف معیار St. Dev.	ضریب تغییرات* CV	کمینه Min	بیشینه Max
dLdB	MWD SI	MWDdLdB	3.00	0.88	29c	0.95	4.12	1.83	1.32	72b	0.15	3.67
		SI dLdB	1.07	0.74	69	0.29	3.03	0.52	0.30	57	0.23	1.29
		MWDLB1	1.47	0.87	59b	0.32	3.18	0.58	0.19	33bc	0.24	1.06
LB	MWD	MWDLB2	2.63	0.86	33a	1.16	3.53	2.47	0.82	33a	0.00	3.45
		MWDLB3	2.50	0.79	31a	1.13	3.42	1.06	0.61	57c	0.46	2.47
		MWDKRFW	0.59	0.26	45b	0.14	1.04	0.41	0.11	26c	0.24	0.69
KR	MWD WSA	MWDKRSW	0.86	0.13	15b	0.61	1.07	0.83	0.06	7.2d	0.69	0.93
		WSAKRFW	64.03	21.27	33	33.67	95.50	39.28	9.55	24	24.00	60.17
		WSAKRSW	88.76	11.40	12	54.75	99.33	79.44	6.01	7.5	67.67	88.58

*بررسی همگنی ضرایب تغییرات از طریق آزمون Levene بین روش‌های مختلف.

*Homogeneity investigation of correlations variation by Levene test among MWD from different methods.

از طرف دیگر اکثر روش‌های به کار رفته برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه در خاک‌های منطقه مرطوب دارای ضرایب همبستگی بالایی با یکدیگر هستند (جدول ۴). بالاترین همبستگی بین MWD_{LB1} و MWD_{KRFW} مخرب وارد بر خاکدانه‌ها شباهت داشته که باعث افزایش میزان تخریب خاکدانه‌های ناپایدار می‌شوند. حتی اگر آن‌ها شامل اندازه‌های مختلف خاکدانه‌ها باشند ولی نیروی مکانیکی تخریب و فروپاشی یکسانی بر خاکدانه‌ها اعمال می‌کنند.

در مورد خاک‌های مناطق خشک، کارایی روش‌های

جدول ۴- ماتریس همبستگی (Spearman Rho) روش‌های استفاده شده برای ارزیابی پایداری خاکدانه

Table 4- Spearman correlation matrix of used methods for aggregate stability assessment

	MWD_{dLdB}	MWD_{LB1}	MWD_{LB2}	MWD_{LB3}	MWD_{KRFW}	MWD_{KRSW}
MWD_{dLdB}	1.00	0.92**	0.85**	0.90**	0.91**	0.73**
MWD_{LB1}	-0.74**	1.00	0.89**	0.94**	0.98**	0.63**
MWD_{LB2}	-0.74**	0.86**	1.00**	0.90**	0.86**	0.70*
MWD_{LB3}	-0.38 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	1.00	0.93**	0.66**
MWD_{KRFW}	0.34 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.00 ^{ns}	0.07 ^{ns}	1.00	0.64**
MWD_{KRSW}	0.19 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	-0.42*	0.33 ^{ns}	0.18 ^{ns}	1.00

مقادیر واقع در سمت چپ قسمت بالا مربوط به مناطق مرطوب و در قسمت پایین به سمت راست مربوط به مناطق خشک است.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, ns عدم معناداری.

Located values in left above part related to moist regions and in right below part related to arid regions.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, ns no significant.

جدول ۵- میانگین شاخص‌های کیفیت برای خاک‌های مناطق مرطوب و خشک

Table 5- Quality indicators mean for moist and arid regions soils

Indices	G1	G2	G3	G4	G5	G6	F1	F2	F3	F4	F5	F6
SOC	4.26 (0.31)	2.44 (0.56)	0.75 (0.06)	2.03 (0.54)	2.91 (0.53)	1.61 (0.37)	1.06 (0.15)	1.04 (0.10)	0.94 (0.05)	0.96 (0.07)	0.81 (0.06)	0.65 (0.05)
SI	15.25 (1.95)	7.32 (1.67)	2.48 (0.16)	4.97 (1.69)	5.94 (1.09)	2.98 (0.63)	7.79 (1.03)	2.91 (0.21)	2.08 (0.14)	2.63 (0.20)	2.01 (0.21)	2.13 (0.29)
BD	1.10 (0.08)	1.41 (0.09)	1.55 (0.09)	1.34 (0.05)	1.65 (0.06)	1.53 (0.11)	1.33 (0.09)	1.44 (0.11)	1.51 (0.09)	1.46 (0.10)	1.12 (0.09)	1.23 (0.11)
AC	0.16 (0.05)	0.12 (0.04)	0.08 (0.01)	0.05 (0.02)	0.04 (0.02)	0.05 (0.01)	0.17 (0.01)	0.07 (0.03)	0.09 (0.04)	0.05 (0.01)	0.05 (0.03)	0.06 (0.03)
PAWC	0.13 (0.03)	0.17 (0.08)	0.13 (0.01)	0.18 (0.02)	0.13 (0.01)	0.13 (0.02)	0.17 (0.01)	0.17 (0.02)	0.16 (0.01)	0.18 (0.01)	0.17 (0.02)	0.16 (0.04)
RWC	0.66 (0.07)	0.65 (0.10)	0.68 (0.03)	0.78 (0.04)	0.82 (0.05)	0.82 (0.04)	0.49 (0.02)	0.72 (0.07)	0.65 (0.07)	0.73 (0.03)	0.62 (0.05)	0.65 (0.04)
S-Index	0.048 (0.015)	0.047 (0.01)	0.047 (0.002)	0.057 (0.005)	0.038 (0.003)	0.038 (0.005)	0.086 (0.01)	0.059 (0.009)	0.057 (0.008)	0.061 (0.003)	0.06 (0.004)	0.06 (0.005)
K_{sat}	53.82 (416.9)	25.97 (16.87)	0.88 (1.62)	0.87 (1.18)	0.75 (3.49)	2.30 (117.2)	77.00 (102.5)	11.11 (224.1)	18.90 (31.31)	0.36 (9.64)	0.32 (8.28)	0.36 (10.36)

SOC: کربن آلی خاک (%), SI: شاخص پایداری ساختمان Pieri (%), BD: جرم مخصوص ظاهری ($Mg\ m^{-3}$), AC: ظرفیت تهویه کل خاک ($m^3\ m^{-3}$), PAWC: مقدار رطوبت قابل استفاده گیاه ($m^3\ m^{-3}$), RWC: ظرفیت رطوبت نسبی ($m^3\ m^{-3}$), S-Index: نقطه عطف منحنی رطوبتی و شاخص کیفیت Dexter, K_{sat} : هدایت هیدرولیکی

اشباع (میانگین هندسی، cmh^{-1}).

انحراف معیار هر شاخص در پرانتز ارائه شده است (\pm).

SOC: soil organic carbon (%), StI: pieri structure stability indicator (%), BD: bulk density ($mg\ m^{-3}$), AC: aeration capacity of total soil ($m^3\ m^{-3}$), PAWC: plant available water capacity ($m^3\ m^{-3}$), RWC: rational water capacity ($m^3\ m^{-3}$), S-Index: turning point of moisture curve and Dexter quality index, K_{sat} : saturation hydraulically conductivity (geometric mean cmh^{-1}).

Standard deviation for each index is presented in parentheses (\pm).

برای خاک‌های G1 و G2 (خاکدانه‌های پایدار) و G3، G4 و G6 (پایداری متوسط تا ناپایدار) مطابقت داشتند. ولی درجه‌بندی کیفیت خاک G5 بر اساس پایداری خاکدانه و ارزیابی از طریق سایر شاخص‌های کیفی متفاوت بود.

خاک‌های مناطق خشک دارای مقادیر SOC زیر کمترین مقدار حد بحرانی ($\leq 2/2\%$) بودند. همچنین مقادیر SI آن‌ها زیر ۵٪ بود به‌جز خاک F1 که نشان‌دهنده یک خاک دارای ساختمان تخریب شده می‌باشد. به‌جز خاک F3 مقدار BD سایر خاک‌ها در محدوده بهینه ($1/84 \leq BD \leq 1/33$) بود. مقادیر PAWC در دامنه دارای محدودیت برای خاک‌های F1 و F3 ($0/10 \leq PAWC \leq 0/15$) و در محدوده خوب برای F2، F4، F5 و F6 ($0/15 \leq PAWC \leq 0/2$) بود. برای همه خاک‌ها به‌جز F1 مقادیر AC و RWC پایین‌تر از حداقل ($0/10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \leq AC$ ، $0/6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \leq RWC$) قرار داشت. K_{sat} برای خاک F5 خیلی کم بود. بر اساس این شاخص‌ها کلاس‌های کیفیت فیزیکی خاک برای خاک‌های خشک از کلاس نسبتاً خوب برای خاک‌های F1 و F2 تا کلاس دارای محدودیت برای سایرین می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد خاک‌های منطقه مرطوب مورد مطالعه بر اساس مقادیر میانگین MWD_{dLdB} ، MWD_{LB1} ، MWD_{KRFW} و MWD_{LB3} در طبقه ناپایدار قرار داشتند به‌جز خاک‌های F2 و F3 که بر اساس MWD_{dLdB} و MWD_{LB3} کلاس متفاوتی داشتند.

با توجه به S-Index در هر دو گروه از خاک‌ها مقادیر بیش از ۰/۳۵ بود که حاکی از شرایط کیفی فیزیکی خاک بهینه می‌باشد (۱۱). این شاخص در مقایسه با سایرین قادر به تعیین تفاوت‌ها در شرایط کیفیتی خاک‌های مورد مطالعه نمی‌باشد. ظاهراً S-Index همیشه معتبر نیست و در شرایط خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق کارایی لازم را ندارد. زیرا شکل منحنی رطوبتی خاک و به تبع آن شیب آن در نقطه عطف (شاخص دکستر) تابعی از ویژگی‌های مختلف خاک مثل پایداری ساختمان خاک، اندازه و آرایش منافذ خاک، آبگریزی و آبدوستی خاک و ... می‌باشد. همچنین هر عامل خارجی که شکل منحنی رطوبتی خاک و به‌ویژه شیب آن را در محدوده خیس تحت تأثیر قرار دهد، بر شاخص دکستر نیز مؤثر است. از جمله این عوامل می‌توان به کاربرد کودهای دامی و فسفات، ماده آلی و کربنات کلسیم و حتی جاذب‌های پلیمری اشاره کرد. این عوامل معمولاً با تأثیر مثبت بر ساختمان خاک می‌توانند باعث افزایش شاخص دکستر شوند.

آزمون مقیاس‌بندی چندبندی ارائه شده در شکل ۳ یک بیان تصویری از شباهت بین روش‌های مختلف بر حسب MWD و سایر شاخص‌های کیفیت خاک‌ها را نشان می‌دهد. نزدیک‌ترین فاصله اقلیدسی بین پارامترها نشان‌دهنده بیشترین شباهت آن‌ها در ارائه کیفیت فیزیکی خاک‌ها می‌باشد. در مورد خاک‌های منطقه مرطوب

برای انتخاب یک روش ارزیابی پایداری خاکدانه مناسب برای خاک‌های خشک و مرطوب، اعتبار آن‌ها از طریق بررسی ارتباط و همبستگی‌شان با سایر شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک ذکر شده توسط رینولدز و همکاران (۳۷) سنجیده شد. میانگین شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک به‌جز در مورد جرم مخصوص ظاهری (جدول ۵) با مقادیر بهینه پیشنهاد شده توسط رینولدز و همکاران (۳۷) مقایسه شد. جرم مخصوص ظاهری خاک‌های مورد مطالعه با مقادیر بحرانی این پارامتر که رشد ریشه را برای خاک‌های مختلف محدود می‌کند و توسط پی‌برک و همکاران (۳۳) پیشنهاد شده بود مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

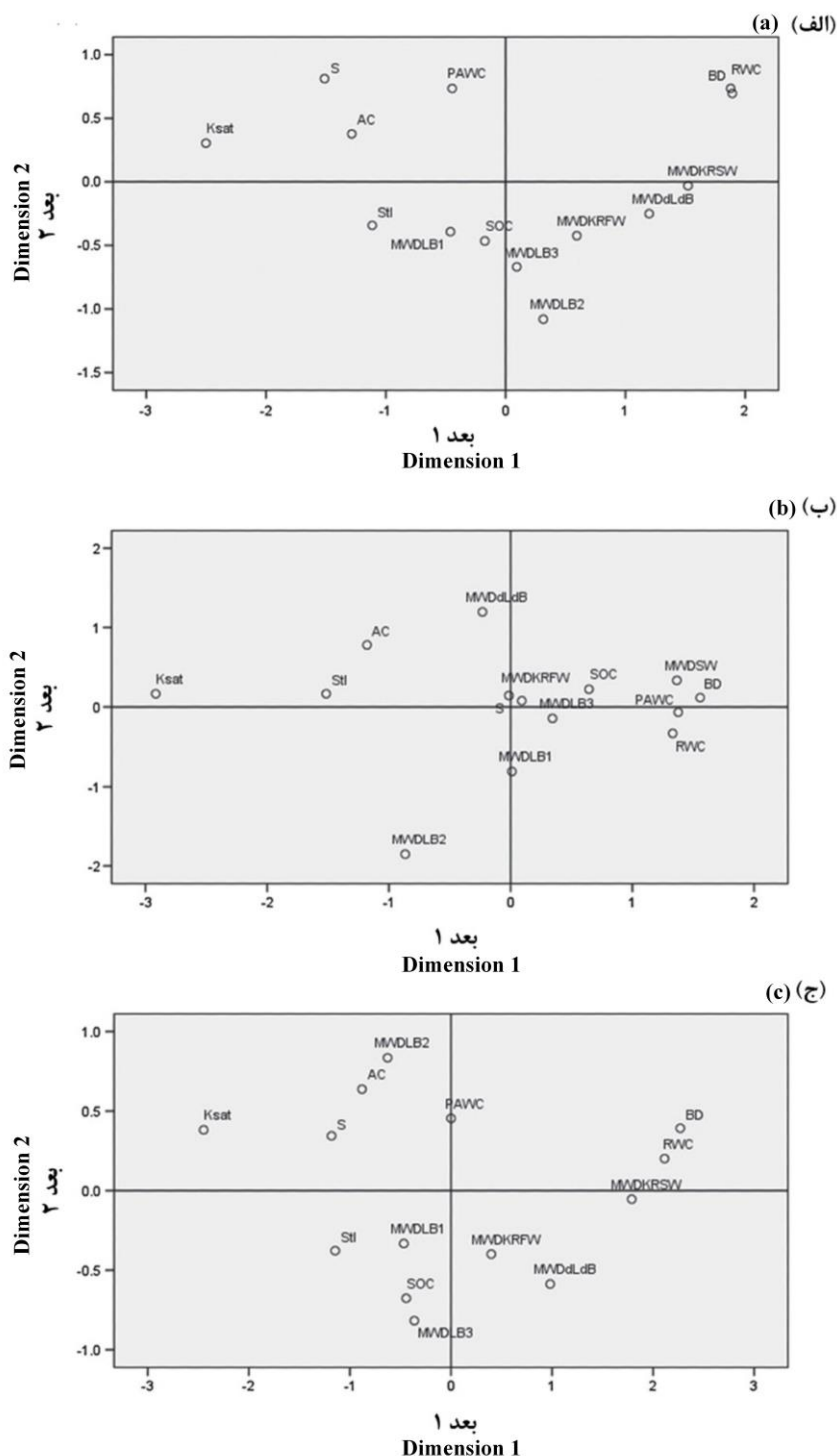
در بین خاک‌های منطقه مرطوب، با توجه به شاخص‌های کیفی فیزیکی خاک به‌جز S-Index، دو گروه کیفی خاک قابل تشخیص است: گروه اول محدوده بهینه خاک‌هاست که خاک‌های G1 و G2 دارای شاخص کیفیت خوب و خاک G3 در کلاس نسبتاً خوب است. گروه دوم گروه دارای محدودیت برای خاک‌های G4 با کلاس نسبتاً ضعیف و G5 و G6 دارای شاخص کیفی ضعیف می‌باشند. این گروه‌بندی کیفیت به‌صورت زیر است:

به‌جز خاک‌های G1، G2 و G5 مقدار SOC خاک‌ها کمتر از ۲/۳٪ (۳/۵٪ ماده آلی خاک) بودند که کمتر از حد بحرانی پیشنهاد شده به وسیله گرینلند (۱۹۸۱) برای حفظ ساختمان خاک در خاک‌های شخم خورده است. بر پایه درجه‌بندی SI ارائه شده توسط پی‌بری (۱۹۹۲) خاک G1 دارای ساختمان پایدار و G2 دارای خطر کم تخریب ساختمان است. در مقابل، سایر خاک‌ها ساختمان تخریب شده دارند. خاک‌های G5 و G6 دارای جرم مخصوص ظاهری بالاتر از مقدار بحرانی (به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بوده که موجب کاهش در ریشه‌دوانی گیاه می‌شوند. سایر خاک‌ها میانگین جرم مخصوص ظاهری‌شان در محدوده بهینه برای ریشه‌دوانی قرار دارند. خاک‌های G1 و G3 دارای AC بیش از $10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ که مقدار مورد نیاز برای تولید زراعی خوب و تهویه منطقه ریشه در خاک‌های لوم سنی و لوم رسی می‌باشد. سایر خاک‌ها تهویه خوبی نداشتند. طبقه‌بندی مشابهی نیز بر اساس RWC به دست آمد. با توجه به PAWC، فقط خاک‌های G1، G5 و G6 در طبقه دارای محدودیت قرار گرفتند که زیر حد بهینه برای عملکرد ریشه، ریشه‌دوانی و مقاومت به خشکی می‌باشند. مقادیر K_{sat} در خاک‌های G3، G4 و G5 زیر حد بهینه ($1/8 - 1/8 \text{ cm h}^{-1}$) قرار دارد که ممکن است گواهِ بر شرایط ضعیف برای انتقال و حرکت آب باشد.

همچنین قابل ذکر است که گروه‌های کیفیت فیزیکی خاک محدود تا بهینه تعیین شده بر اساس شاخص‌های SOC، SI، BD، AC، RWC، PAWC و K_{sat} مطابق با نتایج حاصل از آزمایش‌های پایداری خاکدانه بودند و با MWD_{dLdB} ، MWD_{KRFW} و MWD_{LB1}

و با فاصله بیشتر از این خوشه، MWD_{dLdB} و MWD_{KRSW} بودند که حاکی از شباهت کمتر با شاخص‌های قبلی است.

(شکل ۳ قسمت الف)، MWD_{KRSW} ، MWD_{LB1} ، MWD_{LB2} و MWD_{LB3} نزدیک‌ترین شاخص‌ها به SOC بودند. شاخص‌های دورتر



شکل ۳- مدل فاصله اقلیدسی MWD و سایر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک برای خاک‌های منطقه مرطوب (الف) و خشک (ب) و کل خاک‌های مورد بررسی (ج)

Figure 3- Euclidian distance of MWD and soil physical quality indicators for moist region soils (a), arid (b) and total soils (c)

متوسط است. در هر دو مورد خاک‌های مناطق خشک و مرطوب هنگامی که روش dLdB به‌کار رفت کاهش در مقدار MWD بعد از الکترون کمتر از سایر روش‌ها بود که می‌تواند مربوط به محدوده اندازه خاکدانه‌های استفاده شده (۱۷)، همچنین به دلیل انرژی کم اثر قطره اعمال شده و مقدار رطوبت اولیه خاکدانه قبل از الکترون باشد (۶). در هر دو مورد خاک‌های خشک و مرطوب، مقادیر MWD_{KRFW} و MWD_{LB1} قابل مقایسه هستند. مقایسه پایداری خاکدانه‌های خاک‌های مختلف در صورت استفاده از هر یک از این دو روش امکان‌پذیر است. این نتیجه با نتایج ناصری و همکاران (۲۹) مطابقت دارد.

روهوسکووا و واللا (۳۹) نشان دادند که LB1 و KRFW روش‌های قابل مقایسه‌ای بر حسب پایداری خاکدانه خاک‌های احیا شده می‌باشند. هر دو روش LB1 و KRFW از طریق مرطوب شدن سریع خاکدانه‌های هواخشک انجام می‌شوند. سیبولد و هرریک (۴۰) بیان کردند که کاربرد مرطوب شدن سریع شاخص بهتری برای تشخیص تغییرات در پایداری خاکدانه‌ها به‌عنوان نتیجه‌ای از نحوه مدیریت خاک می‌باشد (۳۸). از طرفی مرطوب شدن سریع، شبیه‌ترین حالت به آبیاری سنتی در مزارع می‌باشد.

در خاک‌های مناطق خشک روش LB3 کارایی خوبی نشان می‌دهد. این روش شامل استفاده از اتانول است که بر طبق اظهارات نیمو و پرکین (۳۲) از ساختار خاکدانه در شرایط خشک محافظت می‌کند (۳۲). اما شباهت یافت شده بین روش‌های LB1، LB3 و مؤید این مطلب است که برای خاک‌های مناطق خشک چسبندگی مکانیکی مرطوب خاکدانه‌ها^۱ در حضور یا عدم حضور فرآیند تکان دادن، مشابه به نظر می‌رسند. با این وجود روش به‌کار رفته در KRFW نسبت به LB3 زمان کمتری نیاز دارد.

عدم شباهت بین شاخص پایداری خاکدانه روش‌های مختلف (MWD) و سایر شاخص‌های کیفی خاک، پیچیدگی ساختمان خاک را تشریح می‌کند که وابسته به مکان است (۲۷). به نظر می‌رسد که SOC می‌تواند به‌عنوان یک شاخص با همستگی زیاد با شاخص پایداری خاکدانه روش‌های LB و KRFW حداقل در خاک‌های متوسط بافت مورد مطالعه می‌باشد. SOC و WSA به‌عنوان شاخص‌های دینامیک کیفیت خاک مطرح هستند که قادرند تحت عملیات مدیریتی مختلف تغییر کنند (۳۹). بنابراین برای ارزیابی اثر تغییرات مقدار SOC بر وضعیت ساختمان خاک، بررسی پایداری خاکدانه به روش‌های KRFW و LB1 می‌تواند مفید باشند. در هنگام استفاده از SOC به‌عنوان یک تخمین‌گر از پایداری خاکدانه

با توجه به خاک‌های مناطق خشک که در شکل ۳ قسمت ب نشان داده شده است MWD_{KRFW} ، MWD_{LB1} و MWD_{LB3} نزدیک‌ترین فاصله را به SOC و S-Index داشتند. شاخص‌های دورتر از این خوشه، مربوط به روش‌هایی است که از پیش تیمار مرطوب شدن استفاده کردند (MWD_{LB2} ، MWD_{KRSW} و MWD_{dLdB}). شاخص‌هایی مثل SI، AC، RWC، BD و PAWC دورتر از MWD مربوط به روش‌های KRFW، KRSW و LB1 و LB3 قرار داشتند. K_{sat} یک موقعیت مجزا در این ماتریکس فاصله داشت که ممکن است مربوط به ضریب تغییرات بالای این ویژگی فیزیکی خاک باشد.

هنگامی که یک مقیاس‌بندی چندبعدی برای همه خاک‌های منطقه مرطوب و خشک به صورت یکجا ترسیم شد (شکل ۳ قسمت ج)، KRFW و LB1 شبیه‌ترین روش‌ها بودند. شرایط مجزای MWD_{KRSW} و MWD_{LB2} و شاخص‌هایی چون K_{sat} ، AC، $S-Index$ ، BD، RWC و PAWC نیز مشهود است. نزدیک‌ترین شاخص کیفیت به MWD_{KRFW} و MWD_{LB1} SOC بود.

تفاوت‌های زیاد در تخمین پایداری خاکدانه بین KRSW و LB2 با سایر روش‌ها مؤید این مطلب است که پایداری خاکدانه با افزایش درجه مرطوب شدن خاک افزایش می‌یابد. این موضوع به کاهش حجم هوای محبوس شده مربوط است که منجر به کاهش نیروهای متراکم‌کننده بر خاکدانه‌ها در طول مرطوب شدن سریع می‌شود (۴۲). اما عدم شباهت بین روش‌های KRSW و LB2 بر حسب MWD حاکی از این است که نتایج حاصل از این دو روش هم برای خاک‌های خشک و هم مرطوب قابل مقایسه نمی‌باشند.

تفاوت در توزیع اندازه خاکدانه حاصل از هر سه تیمار روش LB در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب بیشتر بود (شکل ۲). چنین تفاوت‌هایی در تیمارهای روش LB قبلاً توسط دی‌هانی (۹) و لئوری و همکاران (۲۶) برای خاک‌های مناطق گرم و خشک گزارش شده بود (۸ و ۲۵). همچنین روهوسکووا و واللا (۳۹) گزارش کردند که سه تیمار روش LB امکان تمایز بین مکانیزم‌های خاص فروپاشی خاکدانه را فراهم می‌آورند که یک مزیت برای ارزیابی عوامل پیوندی است (۳۷). در اینجا فقط خاک‌های منطقه خشک بر اساس روش LB (تیمارهای LB1 و LB3 بر اساس MWD) ($P < 0.05$) قابل مقایسه هستند.

علاوه بر این، دویرن سایگین (۱۱) بیان کردند که روش dLdB در مقایسه با LB و KR کارایی بهتری برای ارزیابی خاک‌های درشت بافت دارند (۱۰). این موضوع در مورد خاک‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر صحت ندارد، زیرا روش dLdB در ماتریکس فاصله شکل ۳ قسمت ب، در مکانی مجزا و دور از سایر روش‌ها و شاخص‌های ارزیابی قرار دارد. همچنین بافت خاک‌های مورد مطالعه

باشد. از آنجا که فقط یک شاخص کیفیت خاک (SOC) روند مشابهی با شاخص پایداری حاصل از این دو روش داشت، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری خاکدانه باید با قضاوت و تشخیص صحیح و به اتفاق سایر شاخص‌ها برای یک ارزیابی کلی از شرایط کیفیت فیزیکی خاک استفاده شود. برای خاک‌های متوسط بافت ارزیابی پایداری خاکدانه حاصل از روش‌های dLdB، LB2 و KRSW کارایی لازم جهت تشخیص تفاوت بین شرایط کیفی خاک‌های مختلف را ندارند. هنگامی که هدف از ارزیابی، مقایسه بین شرایط مختلف مثل خاک‌های مناطق خشک و مرطوب یا خاک‌های دو اقلیم متفاوت است، باید از روش‌های مبتنی بر پیش تیمار مرطوب شدن اجتناب کرد. در نهایت اگر یک روش بررسی سریع و ساده از وضعیت ساختمان خاک مورد نیاز باشد، تست‌های ساده مثل KRFW و LB1 می‌توانند مورد استفاده واقع شوند.

باید احتیاط لازم به عمل آید زیرا اجزاء خاصی از SOC می‌تواند به عنوان عامل اصلی و مهم استحکام و پایداری خاک باشد (۳۳).

نتیجه‌گیری

در مورد خاک‌های مناطق خشک، کارایی روش‌های کمپر-رزنا با پیش تیمار مرطوب شدن سریع، لایزسونایس با پیش تیمار مرطوب شدن سریع، و سپس شکستن مکانیکی خاکدانه‌ها به وسیله تکان دادن در اندازه‌گیری پایداری خاکدانه مشابه می‌باشند. در بین روش‌های مختلف آزموده شده تعیین کیفیت خاک بر حسب پایداری خاکدانه، فقط تک الک تر با روش KRFW و LB1 نتایج مشابهی برای هر دو خاک مناطق مرطوب و خشک ارائه می‌کنند. مقادیر MWD هر دو روش برای ارزیابی پایداری خاکدانه می‌توانند به عنوان یک شاخص قابل اعتماد از وضعیت ساختمان خاک برای مقایسه خاک‌های مختلف

منابع

- 1- Amezketta E. 1999. Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14: 83–151.
- 2- An S., Mentler A., Mayer H., and Blum W. 2010. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena* 81: 226–233.
- 3- Arshad M.A., and Coen G.M. 1992. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 25–32.
- 4- Bartlova J., Badalikova B., and Pospisilova L. 2015. Water stability of soil aggregates in different systems of tillage. *Soil and Water Research* 10: 147–154.
- 5- Beare M.H., and Bruce R.R. 1993. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56: 87–104.
- 6- Bruce-Okine E., and Lal R. 1975. Soil erodibility as determined by the raindrop technique. *Soil Science* 119: 149–157.
- 7- Cerdà A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil and Tillage Research* 57: 159–166.
- 8- Cornelis W.M., Khlosi M., Hartmann R., Van Meirvenne M., and De Vos B. 2005. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil–water retention curve. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1902–1911.
- 9- D'Haene K., Vermang J., Cornelis W.M., Leroy B.L.M., Schiettecatte W., De Neve S., Gabriels D., and Hofman G. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil and Tillage Research* 99: 279–290.
- 10- de Leenheer L., and de Boodt M. 1959. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Mededelingen van landbouwhogescholen en de opzoekingsstations van de staat te Gent* 24: 290–300.
- 11- Deviren Saygin S., Cornelis W.M., Erpul G., and Gabriels D. 2012. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. *Applied Soil Ecology* 54: 1–6.
- 12- Dexter A.R. 2004a. Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201–214.
- 13- Dexter A.R. 2004b. Soil physical quality: part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma* 120: 215–225.
- 14- Dexter A.R. 2004c. Soil physical quality: part III: unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120: 227–239.
- 15- Diaz-Zorita M., Perfect E., and Grove J.H. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research* 64: 3–22.
- 16- Emerson W.W. 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47–57.
- 17- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Hopmans, J.W. (Eds.) *Methods of Soil Analysis Part 4 Physical Methods*. SSSA Book Series 5'. Soil Science Society of America, Madison.
- 18- Gijsman A.J. 1996. Soil aggregate stability and soil organic matter fractions under agropastoral systems established in native savanna. *Australian Journal of Soil Research* 34: 891–907.
- 19- Greenland D.J. 1981. Soil management and soil degradation. *Journal of Soil Science* 32: 301–322.

- 20- Henin S., Monnier G., and Combeau A. 1958. Methode pour l'étude de la stabilite structural des sols. *Ann. Agron.*, 9: 73–92.
- 21- Hofman G. 1973. Kritische Studie van de Instabiliteit van Bodemaggregaten en de Invloed op Fysische Bodemparameters. Dissertation. Faculty of Agricultural Sciences, University of Ghent, Belgium.
- 22- Horn R., Taubner H., Wuttke M., and Baumgartl T. 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research* 30: 187–216.
- 23- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution, In: Klute, A. (Ed), *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph N° 9 (2nd Edition), American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
- 24- Lal R., and Shukla M.K. 2004. *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, New York. ISBN 0-8247-5324-0.
- 25- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425–437.
- 26- Leroy B.L.M., Herath H.M.S.K., De Neve S., Gabriels D., Bommele L., Reheul D., and Moens M. 2008. The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture.
- 27- Mueller L., Shepherd G., Schindler U., Ball B.C., Munkholm L.J., Hennings V., Smolentseva E., Rukhovic O., Lukin S., and Hu C. 2013. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil and Tillage Research* 127: 74–84.
- 28- Mueller L., Kay B.D., Hu C., Li Y., Schindler U., Behrendt A., Shepherd T.G., and Ball B.C. 2009. Visual assessment of soil structure: evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany part I: comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil and Tillage Research* 103: 178–187.
- 29- Naseri M., Alimohammadi S., and Jafari A.A.N. 2007. Soil compaction due to sugarcane mechanical harvesting and the effects of physical soil of improvement the on subsoiling. *Journal of Applied Sciences* 7: 3638–3639.
- 30- Nelissen V., Ruyschaert G., Abusi D.M., D'Hose T., De Beuf K., Al-Barri B., Cornelis W., and Boeckx P. 2015. Impact of a woody biochar on properties of a sandy loam soil and spring barley during a two-year field experiment. *Eur J Agron.*, 62: 65-78.
- 31- Niewczas J., and Witkowska-Walczak B. 2003. Index of aggregates stability as linear function value of transition value of transition matrix elements. *Soil and Tillage Research* 70: 121–130.
- 32- Nimmo J.R., and Perkins K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 4 Physical Methods*. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America 317–328.
- 33- Pierce F.J., Larson W.E., Dowdy R.H., and Graham W.A.P. 1983. Productivity of soils: assessing long-term changes due to erosion. *Journal of Soil Water Conservation* 38: 39–44.
- 34- Pieri C.J.M.G. 1992. *Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- 35- Pulido Moncada M., Lobo L.D., and Lozano P.Z. 2009. Association between soil structure stability indicators and organic matter in Venezuelan agricultural soils. *Agrociencia* 43: 221–230.
- 36- Rawlins B.G., Wragg J., and Lark R.M. 2013. Application of a novel method for soil aggregate stability measurement by laser granulometry with sonication. *European Journal of Soil Science* 64: 92–103.
- 37- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., and Yang X.M. 2009. Use of indicators of pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252–263.
- 38- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M., Fox C.A., Tan C.S., and Zhang T.Q. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil and Tillage Research* 96: 316–330.
- 39- Rohoskova M., and Valla M. 2004. Comparison of two methods for aggregate stability measurement – a review. *Plant Soil and Environment* 50: 379–382.
- 40- Seybold C.A., and Herrick J.E. 2001. Aggregate stability kit for soil quality assessments. *Catena* 44: 37–45.
- 41- Shukla M.K., Lal R., and Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research* 87: 194–204.
- 42- Soil Survey Staff. 2014. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil survey investigations report No. 42, Version 5. USDA, NRCS, National Soil Survey Center.
- 43- van Genuchten M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- 44- Vermang J., Cornelis W.M., Demeyer V., and Gabriels D. 2009. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil. *Soil Science Society of America Journal* 73: 718–726.
- 45- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 6: 251–263.
- 46- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy* 28: 337–351.

Comparing Aggregate Stability Tests as One of the Soil Physical Quality Indicators

S. Saadat¹- L. Esmaelnejad^{2*}- H. Rezaei³- R. Mirkhani⁴- J. Seyedmohammadi⁵

Received: 29-07-2018

Accepted: 01-06-2019

Introduction: Soil aggregates refers to groups of soil particles which attach to each other stronger than neighbour particles. Aggregate stability shows the capability and strength of soil aggregates to tolerate breakup when disruptive stresses and destructive forces via mechanical agricultural operation such as tillage and water or wind erosion are applied. Wet aggregate stability shows how well a soil can withstand raindrop impact and water erosion, while size distribution of dry aggregates can be used to predict resistance to abrasion and wind erosion. Aggregate stability changes can act as the first indicators of recovery or degradation of soils. Aggregate stability is an indicator of organic matter content, biological activity, and nutrient cycling in soil. Generally, in small aggregates (< 0.25 mm), the particles are bound by older and more stable forms of organic matter. Microbial decomposition of fresh organic matter releases products (that are less stable) that bind small aggregates into large aggregates (> 2-5 mm). Although, there is not a unique acceptable methodology that serves and applies the entire world up to now, aggregate stability has been introduced as a soil physical quality indicator. Difficulties remain when comparison of aggregate stability from different methodologies are done. The objective of the present study was to assess appropriate and satisfactory aggregate stability tests that enable to distinguish the soil physical quality condition of both arid and moist medium textured soils.

Materials and Methods: A total of 120 soil samples which contained 60 wetland samples from Guilan province with a very humid climate, average annual rainfall of 1285 mm, and average annual temperature of 16°C, and 60 samples from Fars province with dry climate, average rainfall of 225 mm, and the average annual temperature of 27°C were provided. Soil sampling was performed from surface layer (0-20 cm). Each 10 soil samples with similar texture were mixed and one soil sample for each texture was finally obtained. After air drying and sieving, soil texture and organic carbon were determined by pipette and oxidation methods, respectively. Also, undisturbed samples were taken using metal cylinders from surface layer of 5-15 cm for determination of soil saturation coefficient, soil moisture curve, and soil bulk density. Also, in order to determine the aggregate stability, Kemper and Rosenau, de Leenheer and de Boodt, as well as Le Bissonnais were used.

Results and Discussion: Among different tested methods, wet sieving using the well known fast wetting methods of Kemper & Rosenau and of Le Bissonnais presented similar results in both climates. The mean weight diameter value of both methods for assessing aggregate stability can be considered as a dependable indicator of soil structure status for comparing soils. These aggregate stability tests were in correspondence with only one out of the eight soil physical quality indicators when the entire soils were used. It was concluded that the aggregate stability should be used judiciously and in accordance with other indicators for an overall assessing of the soil physical quality condition. The great differences in the estimation of aggregate stability between KRSW and LB2 with other methods confirm that aggregate stability increases with increasing soil moisture content. This involves reducing the amount of air condensed, which results in the reduction of compressive forces on the aggregates during rapid wetting. But the lack of similarity between the KRSW and LB2 methods in terms of MWD suggests that the results of these two methods are not comparable to dry and wet soils. The difference in aggregate size distribution from all three treatments of LB method was higher in dry areas than wet areas. Only dry soils based on LB (LB1 and LB3 treatments based on MWD) ($P < 0.05$) are comparable. In dry soils, the LB3 method is very efficient. This method involves the use of ethanol that protects the aggregate structure against dryness stresses. The lack of similarity between the MWD and other soil quality indicators describes the complexity of the soil structure, which is dependent on the location. It seems that SOC can be considered as an indicator with high correlation with the aggregate sustainability index of LB and KRFW methods, at least in the studied medium-textured soils.

1, 3 and 4- Members of Scientific Board, Soil Reclamation and Sustainable Land Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)

2 and 5- Researchers of Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)

(*- Corresponding Author Email: Esmaelnejad.leila@gmail.com)

Conclusion: Since only a soil quality index (SOC) had a similar trend to the sustainability index derived from these two methods (LB1 and KRFW), it can be concluded that aggregate stability should be judged and recognized correctly, along with other used soil physical indicators for a general assessment of the conditions. In case of arid land soils, efficiency of pre-wetted methods of Kemper and Rosenau and of Le Bissonnais as well as pre-wetted Le Bissonnais with mechanical slaking and shaking were similar. If a simple and rapid analysis of the structure status is needed, single tests such as fast wetted Kemper and Rosenau and Le Bissonnais can be used.

Keywords: Aggregate stability, De Leenheer and de Boodt, Kemper and Rosenau, Le Bissonnais, Soil physical quality indicators