

اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدن بر پایداری ساختمان، توزیع اندازه ذرات و سیستم منافذ خاک

آزاده صفادوست

استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۵/۶)

چکیده

چرخه‌های تر و خشک‌شدن از فرایندهای مهم محیطی است که معمولاً از سازوکارهای تغییر سیستم منافذ خاک به‌شمار می‌روند. همچنین، رس و ماده آلی از ویژگی‌های ذاتی خاک است که در خصوصیات ساختمان خاک اهمیت دارد. هدف از این پژوهش بررسی رابطه بین تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدن، میزان رس و مواد آلی خاک با پایداری ساختمان، توزیع اندازه ذرات و سیستم منافذ خاک بود. برخی ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های خاک پس از یک، سه و پنج چرخه تر و خشک‌شدن تعیین شد. سپس، با پایداری خاکدانه‌های خاک اولیه (خاک بدون تر و خشک‌شدن) مقایسه شد. نتایج نشان داد که بهبود و توسعه خاکدانه‌سازی و پایداری ساختمان خاک برای خاک‌های رسی به‌ویژه خاک رسی که ماده آلی بیشتری داشت، بیشتر بود. یک و سه چرخه تر و خشک شدن تنها در دو نمونه خاک رسی سبب افزایش بیشتر خاکدانه‌سازی نسبت به نمونه‌های خاک دارای رس کمتر شد؛ ولی با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک‌شدن (پنج چرخه)، پایداری خاکدانه‌ها کاهش یافت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تشکیل خاکدانه‌های بزرگ غالباً به ویژگی‌های بافت خاک بستگی دارد تا به میزان ماده آلی خاک؛ و اثر مواد آلی خاک هنگامی که با میزان بالای رس خاک همراه باشد، مؤثر است. همچنین، تراکم ایجادشده در حین نمونه‌برداری طی چرخه‌های تر و خشک‌شدن تعدیل می‌شود و تناوب این چرخه‌ها سازوکار مهمی در بهبود ساختمان خاک است.

کلید واژگان: تراکم، خاکدانه‌سازی، نمونه‌برداری، ویژگی‌های ذاتی.

مقدمه

آثار متقابل محیطی و زیستی، شرایط فیزیکی خاک، به‌ویژه تکامل ساختمان خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. چرخه‌های تر و خشک‌شدن از عوامل محیطی شناخته شده است که بر فرایند خاکدانه‌سازی در برخی خاک‌ها اثر می‌گذارد (Pires et al., 2007). از سویی، کانی‌های رسی و مواد آلی از ویژگی‌های ذاتی خاک است که نقش مهمی در توسعه ساختمان خاک دارد (Le Bissonnais and Singer, 1993; Sullivan, 1990). با توجه به همبستگی زیاد ساختمان خاک و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی، نفوذ آب در خاک، رطوبت موجود در خاک و تهویه خاک، اطلاع از ساختمان خاک و چگونگی توزیع اندازه منافذ بسیار مهم است. یکی از عوامل مهمی که ساختمان خاک و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی خاک را تغییر می‌دهد، تراکم خاک است. تراکم خاک از طریق فعالیت گرم‌های خاکی (Zund et al., 1997)، کشت و کار و چرخه‌های تر و خشک‌شدن (Pillai and McGarry, 1999) تعدیل می‌شود.

ساختمان خاک ویژگی پویایی است که تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدن قرار می‌گیرد. مطالعات نشان داده است که این فرایند در خاک‌های بدون ساختمان ایجاد ساختمان می‌کند (Telfair et al., 1957; Safadoust et al., 2012c). در فرایند تر و خشک‌شدن، فشار ناشی از حبس هوا و آماس ناهمگن توده خاک هنگام خیس‌شدن، سبب شکسته شدن توده خاک به خاکدانه‌های ریزتر می‌شود (Shiel et al., 1988). همچنین، مرطوب‌شدن خاک موجب سست‌شدن پیوندهای بین ذرات به‌ویژه پیوندهای ناپایدار می‌شود، به گونه‌ای که پیوندهای واندروالس در اثر آب‌گیری بین ذرات، به شدت کاهش می‌یابد. tomo and Dexter (1981) در بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک‌شدن متوالی بر پایداری ساختمان خاک نشان دادند که در تمامی خاک‌ها با افزایش چرخه‌های تر و خشک‌شدن، مقدار خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر افزایش یافت. همچنین، Horn and Dexter (1989) گزارش کردند که چرخه‌های تر و خشک‌شدن متوالی باعث آرایش‌یافتن مجدد ذرات و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. آن‌ها گزارش کردند که تر و خشک‌شدن سبب سهولت جابه‌جایی مواد پیونددهنده بین ذرات خاک می‌شود و در اتصال ذرات به

روش الک تر (Yoder, 1936) است. این روش سبب تفکیک خاکدانه‌های پایدار در آب، با اندازه‌های مختلف می‌شود. بررسی مقاومت کششی خاکدانه‌ها نیز یکی از روش‌های ارزیابی ساختمان خاک است (Rahimi *et al.*, 2000). مقاومت کششی خاک بستگی به وجود نقاط ضعیف در خاک دارد. این نقاط ضعیف و درز و ترک‌های ریز سبب کاهش مقاومت کششی خاک می‌شود. در واقع، با تعیین مقاومت کششی خاک، می‌توان برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را پیش‌بینی کرد. برای مثال، درز و ترک یا شکاف‌ها حین چرخه‌های تر و خشک‌شدن یا بر اثر اعمال مدیریت‌های مختلف زراعی، بر مقاومت کششی خاک و خاکدانه‌ها مؤثر است (Dexter and Watts, 2000).

در خاک‌های زراعی معمولاً خاک‌ورزی در پاییز سبب ایجاد تغییراتی در ساختمان خاک می‌شود که پس از گذشت چرخه‌های تر و خشک‌شدن متوالی، خاک دارای ساختمان جدیدی می‌شود و متعاقباً پایداری ساختمان آن تغییر می‌کند. لذا، با توجه به شرایط آب‌وهوایی منطقه همدان و شرایط جوی متفاوت در شبانه‌روز، هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر تعداد چرخه‌های مختلف تر و خشک‌شدن بر پایداری و ساختمان خاک در نمونه خاک‌های دارای میزان رس و مواد آلی متفاوت بود.

مواد و روش‌ها

پس از بررسی اولیه برخی خاک‌های استان همدان، چهار نوع خاک مختلف از مزارع به گونه‌ای انتخاب شد که نماینده خاک‌های دارای رس و ماده آلی پایین (خاک ۱)، رس پایین-ماده آلی بالا (خاک ۲)، رس و ماده آلی بالا (خاک ۳) و رس بالا-ماده آلی پایین (خاک ۴) باشد. از هر منطقه مقداری نمونه خاک دست‌خورده و شانزده نمونه خاک دست‌خورده (با استفاده از استوانه با قطر ۵/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) برداشت شد.

نمونه خاک‌های مورد نظر به آزمایشگاه منتقل و هواخشک شد. سپس، ویژگی‌های آن‌ها شامل توزیع اندازه ذرات اولیه به روش پی‌پت (Gee and Bauder, 1986)، مقدار ماده آلی به روش اکسایشی تر (Walkley and Black, 1934)، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Black and Hartge, 1986)، جرم مخصوص حقیقی با استفاده از پیکنومتر، اسیدیته خاک با استفاده از pH متر (Thomas, 1996) و هدایت الکتریکی با استفاده از EC متر (Rhoades, 1996) اندازه‌گیری شد. برخی ویژگی‌های نمونه خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

یکدیگر نقش مهمی ایفا می‌کند، به گونه‌ای که خشک‌شدن سبب افزایش نیروهای کشش سطحی یا تنش مؤثر ناشی از مکش ماتریک می‌شود و ذرات خاک را به یکدیگر نزدیک می‌کند. همچنین، هلال آب اطراف ذرات سبب انتقال مواد پیونددهنده (ذرات کلوییدی، مواد آلی محلول و معلق و کربنات کلسیم) به نقاط تماس بین ذرات خاک می‌شود (Kay, 1990; Zhang *et al.*, 2005).

از طرفی مطالعات نشان داده است که چرخه‌های تر و خشک‌شدن یا انجماد و ذوب‌شدن متوالی سبب سست‌شدن خاکدانه‌ها به دلیل ایجاد ترک‌های ریز می‌شود (Utomo and Dexter, 1981). علت تشکیل ترک‌ها، افزایش حجم آب خاک، همچنین انبساط و انقباض ناهمگن در حین تر و خشک‌شدن است که سبب گسستگی پیوندهای خاک و ایجاد ترک می‌شود. ترک‌های ایجادشده ناشی از انجماد و ذوب‌شدن با چشم غیرمسلح دیده می‌شود، در حالی که ترک‌های ناشی از چرخه‌های تر و خشک شدن چندان مشهود نیست. مطالعات متعددی نشان داده است که هنگام نمونه‌برداری دست‌نخورده از خاک با استوانه‌های نمونه‌برداری، ساختمان خاک در کناره‌های سیلندر نمونه‌برداری تغییر می‌کند (Defossez and Richard, 2004; Vogel and Roth, 2003; Pires *et al.*, 2004). تغییرات طی دوره‌های تر و خشک‌شدن اصلاح می‌شود (Pires *et al.*, 2007).

همان‌طور که اشاره شد از دیگر عوامل مؤثر بر خاکدانه‌سازی، رس خاک و مواد آلی است (Franzluebberes, 2002). مواد آلی سبب چسبندگی مواد معدنی به یکدیگر می‌شود یا به شکل توده‌های ریز، در برخی موارد همانند شبکه عمل می‌کند و سبب در برگرفتن ذرات خاک، تشکیل ساختمان و پایداری آن می‌شود (Tiplittgr *et al.*, 1968). Elustondo و همکاران (1990) معتقدند که نقش مثبت رس در افزایش پایداری ساختمان خاک به دلیل توانایی رس در ایجاد پیوند بین ذرات معدنی- معدنی و معدنی- آلی است. آن‌ها همچنین، به نقش مثبت رس در نگهداری ماده آلی خاک اشاره کردند، به طوری که بخشی از مواد آلی چسبیده به ذرات رس با افزایش مقدار رس خاک افزایش می‌یابد.

Angers and Carter (1996) معتقدند که واژه پایداری ساختمان خاک به توانایی خاک در نگهداری آرایش ذرات جامد و منافذ بین آن‌ها هنگام مواجه‌شدن با تنش‌های مختلف گفته می‌شود؛ و روش‌ها و شاخص‌های متعددی برای ارزیابی آن پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، بررسی توزیع اندازه خاکدانه‌ها با استفاده از

جدول ۱. برخی ویژگی‌های نمونه خاک‌های مورد بررسی*

شماره خاک	طول و عرض جغرافیایی	بافت خاک	Clay	Sand	Silt	OM	CaCO ₃	pH	EC	ρ_s	ρ_b
۱	48° 02' 07" E , 34° 29' 09" N	SCL	۲۶/۰	۶۷/۰	۷/۰	۰/۵۶	۲۲/۵	۷/۳	۰/۵۵	۲/۶۶۵	۱/۵۵
۲	47° 59' 16" E , 34° 39' 14" N	SCL	۲۸/۰	۶۰/۰	۱۲/۰	۲/۲۱	۲۴/۰	۷/۸	۰/۶۹	۲/۶۵۲	۱/۴۵
۳	48° 10' 03" E , 34° 20' 06" N	C	۵۷/۰	۱۷/۰	۲۶/۰	۲/۱۰	۲۲/۰	۷/۲	۰/۵۳	۲/۶۸۰	۱/۲۶
۴	48° 74' 11" E , 34° 35' 11" N	C	۴۵/۰	۲۱/۰	۳۴/۰	۰/۸۳	۱۹/۰	۷/۵	۰/۶۲	۲/۷۳۲	۱/۳۴

* Clay رس (%): Sand شن (%): Silt سیلت (%): OM ماده آلی (%): CaCO₃ کربنات کلسیم (%): pH اسیدیته خاک، EC هدایت الکتریکی (dS m⁻¹): ρ_s جرم مخصوص حقیقی (Mg m⁻³): ρ_b جرم مخصوص ظاهری (Mg m⁻³): SCL لوم رسی شنی؛ C رسی

اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها به روش غیرمستقیم یا برزلی برای خاکدانه‌های اندازه ۸-۶/۳ میلی‌متر انجام شد. در این روش پس از جدا کردن خاکدانه‌های مذکور به روش الک خشک، سی عدد از خاکدانه‌ها به طور جداگانه وزن شد. نیروی بیشینه شکست برای شکسته شدن هر یک از آن‌ها با دستگاه تک‌محوری با سرعت بارگذاری ۱/۲ سانتی‌متر بر دقیقه اندازه‌گیری شد. در نهایت، مقاومت کششی خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Dexter and Kroesbergen, 1985).

$$Y = \frac{F}{d_{eff}^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه F نیروی فشاری مورد نیاز برای شکستن خاکدانه‌ها، d_{eff} قطر مؤثر خاکدانه و Y مقاومت کششی خاکدانه‌ها است. قطر مؤثر خاکدانه (d_{eff}) نیز با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$d_{eff} = d \cdot \left(\frac{M_a}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه d_0 قطر متوسط خاکدانه‌ها، M_0 میانگین جرم سی عدد خاکدانه و M_a جرم خاکدانه مورد نظر است (Dexter, 1988).

برای تعیین منحنی رطوبتی از نمونه‌های دست‌نخورده (با استفاده از استوانه با قطر ۵/۱ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) استفاده شد. منحنی مشخصه رطوبتی (SWC) با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن برای مکش‌های پایین‌تر از ۱۰۰ سانتی‌متر (Clement, 1966) و صفحات فشاری برای مکش‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (Klute, 1986) تعیین شد. برای محاسبه گنجایش زراعی (FC)، نقطه پژمردگی (PWP) و مقدار آب فراهم (AWC) خاک نیز از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شد. بدین صورت که مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک ۱۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر به ترتیب FC و PWP در نظر گرفته شد و مقدار آب فراهم با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد.

تیمارهای تر و خشک شدن شامل بدون چرخه تر و خشک شدن (T0)، یک چرخه تر و خشک شدن (T1)، سه چرخه تر و خشک شدن (T3) و پنج چرخه تر و خشک شدن (T5) در نظر گرفته شد. به منظور انجام چرخه‌های تر و خشک شدن، نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده ابتدا به آهستگی طی ۲۴ ساعت از زیر ستون اشباع شد. سپس، در فصل تابستان و در آفتاب به مدت یک تا دو هفته در هوای آزاد قرار گرفت تا هوا-خشک شود؛ بدین صورت که نمونه‌های خاک پس از گذشت یک هفته، در زمان‌های مختلف وزن می‌شد و چنانچه پس از سه بار وزن کردن در طول یک هفته تغییر وزنی در آن‌ها مشاهده نمی‌شد، نمونه هوا-خشک در نظر گرفته می‌شد. برای هر نمونه خاک، در هر تیمار، مقداری از نمونه خاک دست‌خورده و چهار نمونه دست‌نخورده، تر و خشک شد. پس از آماده شدن نمونه خاک‌های مورد نظر به روش مذکور، مقداری از هر خاک به آرامی از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک‌های آماده شده از روش الک تر با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و ارتفاع نوسان ۱/۳ سانتی‌متر استفاده شد (Khazaei et al., 2008). بدین ترتیب که ۵۰ گرم از خاک الک شده روی یک سری الک (به ترتیب از بالا به پایین دارای قطر ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر) ریخته شد و به مدت ۱۰ دقیقه با آب معمولی تکان داده شد. پس از آن، الک‌ها را به آرامی از آب خارج کردند و خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد (Yoder, 1936).

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه n تعداد دامنه اندازه خاکدانه، \bar{x}_i میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک، و w_i نسبت وزن خشک خاکدانه‌های روی هر الک i به وزن خشک کل خاکدانه‌های خاک (پس از تصحیح شن و سنگریزه) است. MWD برای هر نمونه خاک تیمار شده در ده تکرار تعیین شد.

(رابطه ۴)

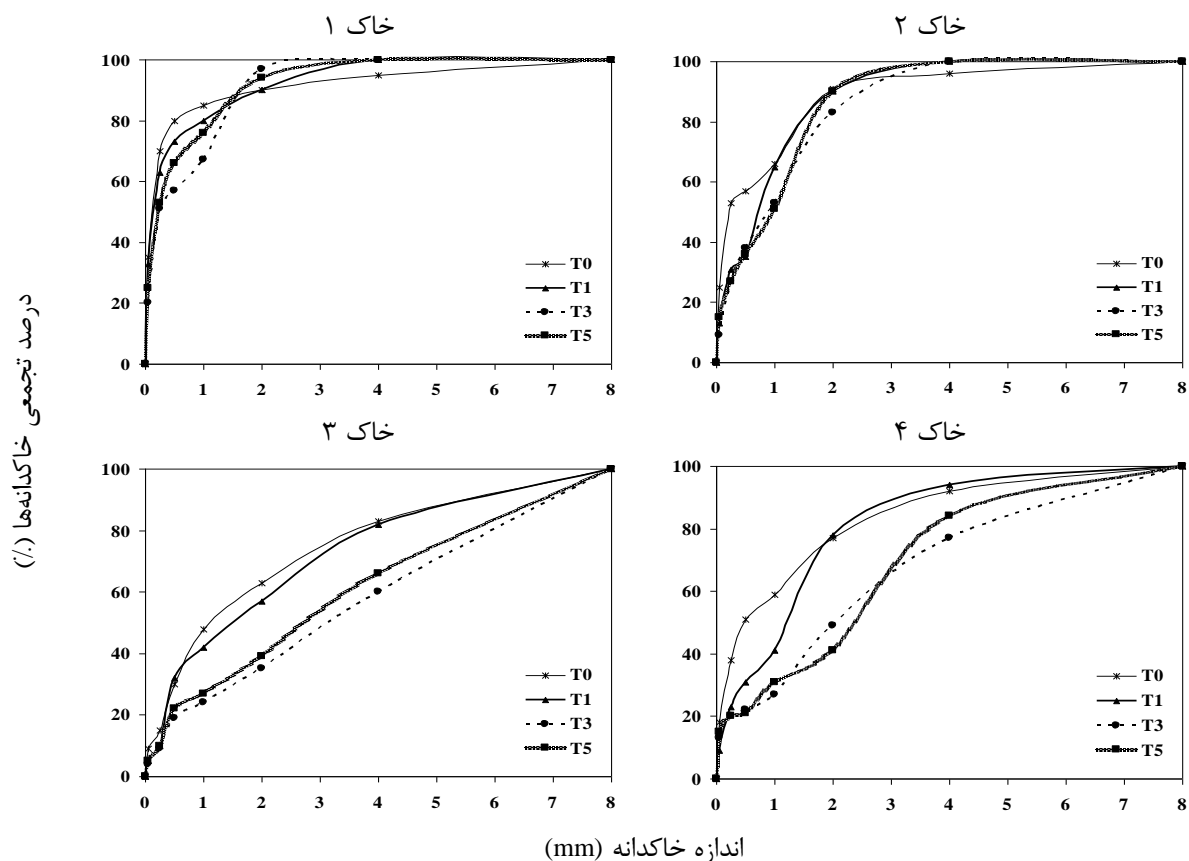
$$AWC = FC - PWP$$

نتایج و بحث

تفاوت توزیع اندازه خاکدانه‌های نمونه خاک‌های مختلف طی چرخه‌های متفاوت تر و خشک‌شدن در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر نمونه خاک فاصله بین منحنی‌ها نشان‌دهنده تفاوت ایجاد شده در پایداری ساختمان خاک طی چرخه‌های تر و خشک‌شدن است.

در نمونه خاک ۱ که میزان رس و ماده آلی کم بود (جدول ۱)، چرخه‌های تر و خشک‌شدن سبب تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در پایداری ساختمان خاک نشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از انجام آزمایش‌های الک تر، اکثر خاکدانه‌ها اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر دارد (T1 حدود ۶۳ درصد؛ T3 حدود ۵۱ درصد و T5 حدود ۵۳ درصد). در نمونه خاک ۲ و دارای رس کم ولی میزان ماده آلی بیش، این مقدار حدوداً به کمتر از ۳۰ درصد رسید (میانگین T1، T3 و T5)، که نشان‌دهنده نقش ماده آلی در پایداری ساختمان خاک است. این در حالی است که نتایج نشان داد در نمونه خاک‌های ۳ و ۴ که دارای رس بیشتری بود، اعمال چرخه‌های تر و خشک‌شدن سبب ایجاد تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در پایداری

ساختمان خاک شد، به گونه‌ای که در نمونه خاک ۳ بیش از ۹۰ درصد خاکدانه‌ها اندازه‌های بزرگ‌تر ۰/۲۵ میلی‌متر داشت. در نمونه خاک ۴ و دارای ماده آلی کمتری نسبت به نمونه خاک ۳، این مقدار به کمتر از ۸۰ درصد رسید. این موضوع بیانگر پایداری بیشتر ساختمان خاک در خاک‌های رسی است، به طوری که حتی حدود ۳۰ درصد (میانگین T1، T3 و T5) از خاکدانه‌های خاک ۳ و ۱۸ درصد (میانگین T1، T3 و T5) از خاکدانه‌های نمونه خاک ۴ اندازه‌های بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر داشت، در حالی که در نمونه خاک‌های ۱ و ۲ خاکدانه‌ای در این دامنه قرار نگرفت. Safadoust و همکاران (2011, 2012a, 2012b) نیز گزارش کردند که اعمال چرخه‌های تر و خشک‌شدن و یخ‌زدن و ذوب‌شدن سبب ایجاد ساختمان خاک در خاک‌های بدون ساختمان، به‌ویژه در خاک‌های رسی، می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، اعمال یک و سه چرخه تر و خشک‌شدن سبب تشکیل خاکدانه‌های با قطر بزرگ‌تر شد ولی پس از پنج چرخه تر و خشک‌شدن به علت ایجاد درز و ترک‌های ریز در خاکدانه‌ها، پایداری آن‌ها کمتر و میزان خاکدانه‌های ریز بیشتر شد.



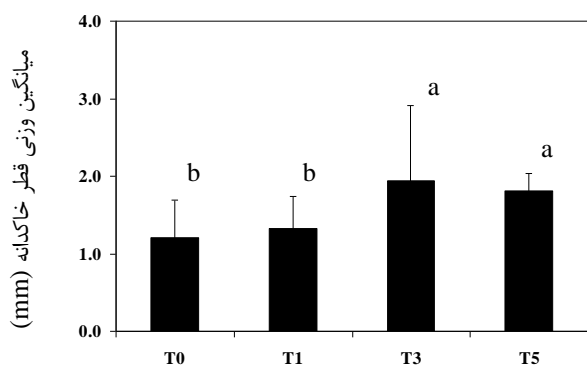
شکل ۱. اثر چرخه‌های متفاوت تر و خشک‌شدن (بدون تر و خشک‌شدن T0؛ یک چرخه T1؛ سه چرخه T3 و پنج چرخه T5) بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک‌های مورد بررسی (خاک ۱: رس و ماده آلی پایین، خاک ۲: رس پایین - ماده آلی بالا، خاک ۳: رس و ماده آلی بالا و خاک ۴: رس بالا - ماده آلی پایین)

جدول ۲. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm) در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن (بدون تر و خشک شدن T0؛ یک چرخه T1؛ سه چرخه T3 و پنج چرخه T5)

در نمونه‌های مورد بررسی				
T5	T3	T1	T0	شماره خاک
۰/۶۱ ^a (±۰/۱۷)	۰/۶۱ ^a (±۰/۲۱)	۰/۵۹ ^a (±۰/۰۹)	۰/۵۴ ^a (±۰/۰۵) [*]	۱
۱/۰۵ ^a (±۰/۴۸)	۱/۱۴ ^a (±۰/۳۴)	۰/۹۵ ^b (±۰/۳۳)	۰/۹۰ ^b (±۰/۱۸)	۲
۳/۱۲ ^b (±۰/۲۵)	۳/۴۰ ^a (±۰/۱۱)	۲/۲۲ ^c (±۰/۲۳)	۲/۰۵ ^d (±۰/۷۲)	۳
۲/۴۹ ^b (±۰/۴۴)	۲/۶۱ ^a (±۰/۶۲)	۱/۵۲ ^c (±۰/۶۲)	۱/۳۴ ^d (±۰/۵۳)	۴

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف معیار داده‌هاست.

گزارش کردند که رس مهم‌ترین عامل تشکیل خاکدانه و موجب پایداری ساختمان خاک است. با مقایسه نمونه خاک ۳ با نمونه خاک‌های ۱، ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که هنگامی که رس و ماده آلی در کنار هم باشند، نقش آن‌ها در افزایش پایداری ساختمان خاک نسبت به اثر هر کدام به تنهایی بیشتر خواهد شد، به طوری که مقدار MWD در نمونه خاک ۳ به ترتیب ۸۶ درصد، ۶۴ درصد و ۲۴ درصد بیشتر از نمونه خاک‌های ۱، ۲ و ۴ به‌دست آمد (جدول ۲).



شکل ۲. تأثیر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میانگین نمونه‌های مورد بررسی)

نتایج نشان می‌دهد که در هر سه چرخه تر و خشک شدن (یک، سه و پنج چرخه) مقدار مقاومت کششی خاکدانه‌ها در نمونه خاک ۳ و دارای بیشترین مقدار رس و ماده آلی، بیشتر به‌دست آمد (جدول ۳). Boravka *et al.* (1997) نیز در بررسی تأثیر رس بر تشکیل ساختمان خاک، نشان دادند که با افزایش درصد رس، پایداری خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. آن‌ها دریافتند که نوع کانی‌های رس نیز عامل مهمی در میزان پایداری خاکدانه‌هاست. اثر مثبت رس به نقش آن در خاکدانه‌سازی، ایجاد درز و ترک ناشی از انقباض و انبساط و به عبارتی نقش فیزیکی و شیمیایی آن برمی‌گردد. از طرفی Dexter and Watts (2000) دریافتند که با افزایش مقدار ماده آلی، مقاومت کششی

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و مقاومت کششی خاکدانه (Y)، به منزله شاخص‌هایی از پایداری ساختمان خاک، برای نمونه خاک‌های آماده‌شده در هر چرخه از فرایندهای تر و خشک شدن بررسی شد (جدول‌های ۲ و ۳).

با مقایسه MWD نمونه خاک‌های مختلف قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن مشخص می‌شود که به طور کلی تر و خشک شدن سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک شد (جدول ۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه خاک ۳ که میزان رس و ماده آلی بالا بود، میزان MWD بیشتر از سایر خاک‌ها به دست آمد (جدول ۲)، به طوری که MWD (میانگین چرخه‌های تر و خشک شدن) در خاک ۱، ۰/۵۹ در خاک ۲، ۱/۰۱ در خاک ۳، ۲/۷۰ و در خاک ۴، ۱/۹۹ میلی‌متر به‌دست آمد. در واقع، چرخه‌های تر و خشک شدن با تغییر در اندازه منافذ و شکل‌گیری مجدد خاکدانه‌های خاک مقاومت خاک، چسبندگی ذرات، اندازه و پایداری خاکدانه‌ها و اندازه منافذ را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Telfair *et al.*, 1957; Newman and Thomasson, 1957).

همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن (از یک چرخه به سه چرخه) پایداری خاکدانه‌ها بیشتر شد، ولی پس از سه چرخه، افزایش بیشتر تعداد چرخه‌ها (پنج چرخه) سبب کاهش پایداری خاکدانه‌ها شد که از نظر آماری این کاهش (بین T3 و T5) معنادار نبود (شکل ۲). Pires و همکاران (2007) گزارش کردند که حداقل سه چرخه تر و خشک شدن برای تشکیل مجدد ساختمان خاک لازم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش MWD در نمونه خاک‌های ۳ و ۴ بیشتر مشهود است، که نشان‌دهنده نقش غالب رس در پایداری ساختمان خاک است که با یافته‌های Shainberg *et al.* (1981) مطابقت دارد. آن‌ها گزارش کردند که با افزایش مقدار رس، پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابد؛ و با بررسی عوامل مختلفی که بر پایداری خاکدانه‌ها نقش دارند

خاک تغییر می‌کند، به طوری که نمونه خاک در لبه سیلندرها فشرده و متراکم می‌شود (Pires *et al.*, 2007). Pires و همکاران (2004) با مطالعه تأثیر سیلندرهاى نمونه‌برداری با اندازه‌های مختلف بر نمونه خاک (خاک لوم‌شنی) گزارش کردند که افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در کناره‌های سیلندرهاى نمونه‌برداری نسبت به مرکز نمونه سبب تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک می‌شود. این موضوع سبب خطا در رابطه با بررسی ساختمان خاک و مدیریت‌های زراعی اعمال شده بر خاک می‌شود (Pagliani *et al.*, 1987).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن در نمونه‌های سیلندری این تغییرات تعدیل شد، به طوری که پس از سه چرخه تر و خشک شدن، ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در سیلندرهاى نمونه‌برداری تقریباً هماهنگ با نمونه کلوخه‌ای شد و تفاوت معناداری بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود (جدول ۴). مطالعات نشان داده است چرخه‌های تر و خشک شدن آثار چشمگیری بر ساختمان خاک در مقیاس میکروسکوپی (Watts *et al.*, 2001) و ماکروسکوپی (Shiel *et al.*, 1988) دارد. تر شدن سبب تغییراتی به واسطه آماس غیریکنواخت، حبس هوا و تراکم و گرمای پخشیدگی می‌شود. در خشک شدن نیز ذرات خاک در نتیجه تنش مؤثر حاصل از افزایش مکش آب- خاک (Kay, 1990) و جای‌گیری ذرات ریز در بین ذرات درشت‌تر، دوباره چیده می‌شود. این فرایندها بیشتر در خاک‌های رسی مشهود است (Zhang *et al.*, 2005).

در شکل ۳ منحنی مشخصه رطوبتی برای نمونه‌های سیلندری پس از چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال یک و سه چرخه تر و خشک شدن میزان رطوبت نگهداری شده در تمامی مکش‌های ماتریک افزایش یافته است، که این تغییرات به ویژه در نمونه خاک‌های رسی در مکش‌های پایین مشهود است. ولی اعمال بیشتر چرخه‌های تر و خشک شدن (پنج چرخه) سبب کاهش مقدار رطوبت نگهداری شده، به‌ویژه در مکش‌های پایین شده است. این امر ممکن است ناشی از خرد شدن بیشتر ذرات خاک در طی پنج چرخه تر و خشک شدن و جای‌گیری آن‌ها در منافذ درشت و در نتیجه کاهش حجم منافذ خاک باشد.

خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. آن‌ها خاک‌هایی با مدیریت‌های مختلف را بررسی کردند و نشان دادند که ماده آلی تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت کششی خاکدانه‌ها دارد.

همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، سه چرخه تر و خشک شدن سبب افزایش مقاومت کششی خاکدانه‌ها، به علت افزایش پایداری و استحکام آن‌ها شده است، درحالی که افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن به پنج چرخه سبب کاهش مقاومت کششی در هر چهار نوع خاک شد. Utomo and Dexter (1981) دریافتند که تر و خشک شدن متوالی باعث کاهش مقاومت کششی خاکدانه‌ها طی فصول مختلف سال می‌شود. آن‌ها همچنین، گزارش کردند تر و خشک شدن موجب افزایش تردی خاک می‌شود. کاهش مقاومت خاکدانه‌ها حین تر و خشک شدن، نتیجه ایجاد ترک‌های ریز به وسیله انبساط ناهمگن، سپس انقباض خاکدانه‌هاست. همچنین، تر و خشک شدن ناهمگن سبب افزایش تنش‌های درونی و ترک‌های درون خاکدانه، در خاکدانه‌های بزرگ‌تر می‌شود (Utomo and Dexter, 1981). Grant و همکاران (1992) و McKenzie and Dexter (1987) گزارش کردند که خاکدانه‌های مجاور ریشه نسبت به خاکدانه‌های دور از ریشه، مقاومت کششی کمتر و تردی بیشتری دارد. در واقع، به دلیل تر و خشک شدن و شدیدبودن آن، این خاکدانه‌ها نسبت به خاکدانه‌های دور از ریشه، تردی بیشتری دارد.

در جدول ۴ ویژگی‌هایی از خاک شامل جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، گنجایش زراعی، نقطه پژمردگی دائم و مقدار آب قابل استفاده در خاک به صورت کلوخه و نمونه‌برداری شده با سیلندر نمونه‌برداری در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، در همه نمونه‌های خاک، در نمونه سیلندری، جرم مخصوص ظاهری افزایش و رطوبت اشباع، گنجایش زراعی و مقدار آب قابل استفاده نسبت به نمونه کلوخه‌ای کاهش یافته است، که نشان‌دهنده تغییر در توزیع اندازه منافذ در نمونه‌های خاک هنگام نمونه‌برداری با استفاده از سیلندرهاى نمونه‌برداری است. مطالعات نیز نشان داده است که ساختمان خاک تحت تأثیر نمونه‌برداری قرار می‌گیرد و طی نمونه‌برداری آرایش منافذ

جدول ۳. مقاومت کششی خاکدانه‌ها (kPa) در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن (بدون تر و خشک شدن T0؛ یک چرخه T1؛ سه چرخه T3 و پنج چرخه T5)

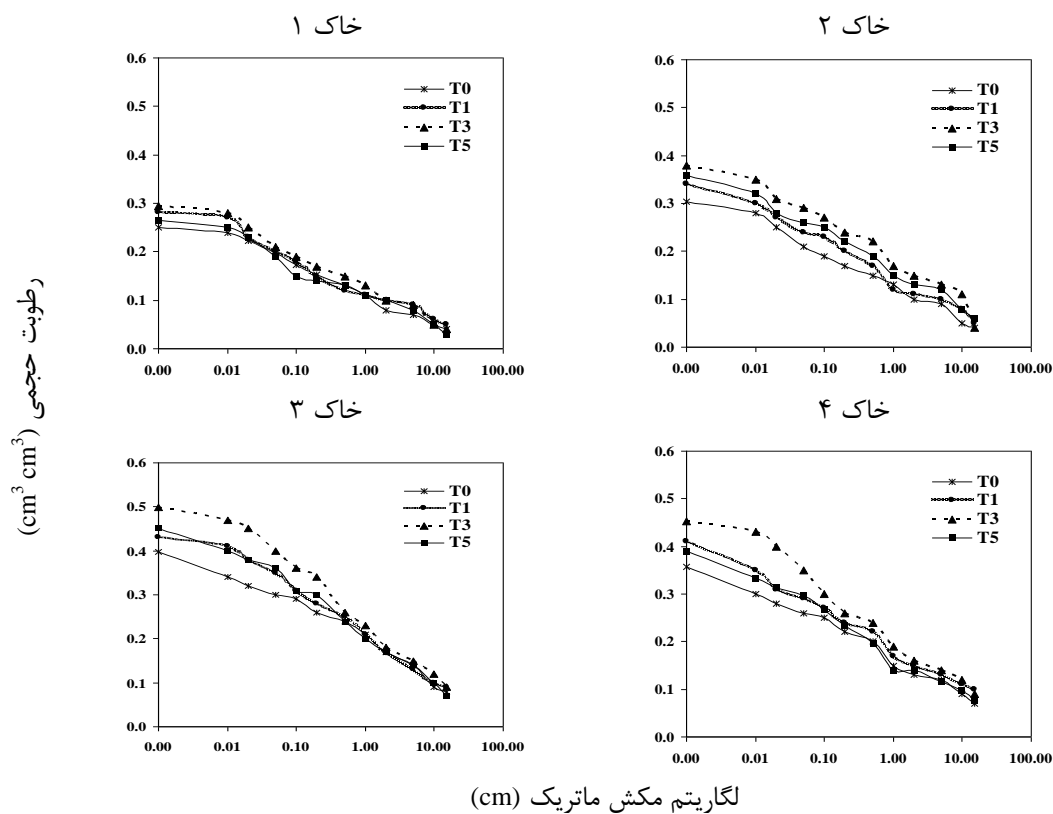
در نمونه خاک‌های مورد بررسی				
شماره خاک	T0	T1	T3	T5
۱	۶۲ ^b (±۱۴)*	۶۴ ^b (±۱۰)	۸۶ ^a (±۱۲)	۷۲ ^a (±۱۸)
۲	۸۳ ^b (±۱۰)	۹۰ ^b (±۸)	۱۱۲ ^a (±۱۷)	۹۱ ^b (±۱۵)
۳	۱۶۲ ^b (±۱۸)	۱۶۹ ^b (±۲۱)	۱۹۳ ^a (±۲۲)	۱۸۷ ^a (±۲۶)
۴	۱۵۷ ^b (±۲۰)	۱۶۱ ^b (±۱۱)	۱۸۴ ^a (±۱۰)	۱۸۰ ^a (±۱۹)

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف معیار داده‌هاست.

جدول ۴. جرم مخصوص ظاهری ($Mg\ m^{-3}$)، رطوبت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$)، گنجایش زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دایم (PWP) و مقدار آب قابل استفاده (AWC) در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن (بدون تر و خشک شدن T0؛ یک چرخه T1؛ سه چرخه T3 و پنج چرخه T5) در نمونه خاک‌های مورد بررسی

شماره خاک	ویژگی‌های اندازه‌گیری شده	اندازه‌گیری شده در نمونه کلوخه‌ای	T0	T1	T3	T5
۱	ρ_b	$1/55^a (\pm 0/15)^*$	$1/62^a (\pm 0/09)$	$1/61^a (\pm 0/20)$	$1/56^a (\pm 0/13)$	$1/59^a (\pm 0/21)$
	θ_s	$0/42^a (\pm 0/08)$	$0/39^a (\pm 0/04)$	$0/40^a (\pm 0/12)$	$0/42^a (\pm 0/09)$	$0/40^a (\pm 0/11)$
	FC	$0/142^a (\pm 0/02)$	$0/131^b (\pm 0/02)$	$0/137^b (\pm 0/05)$	$0/144^a (\pm 0/03)$	$0/120^c (\pm 0/04)$
	PWP	$0/05^a (\pm 0/01)$	$0/05^a (\pm 0/00)$	$0/05^a (\pm 0/01)$	$0/04^a (\pm 0/00)$	$0/03^a (\pm 0/00)$
	AWC	$0/092^b (\pm 0/02)$	$0/081^c (\pm 0/03)$	$0/087^b (\pm 0/02)$	$0/104^a (\pm 0/02)$	$0/090^b (\pm 0/05)$
۲	ρ_b	$1/45^a (\pm 0/26)$	$1/55^b (\pm 0/18)$	$1/55^b (\pm 0/09)$	$1/48^a (\pm 0/16)$	$1/54^b (\pm 0/22)$
	θ_s	$0/43^a (\pm 0/15)$	$0/42^a (\pm 0/11)$	$0/42^a (\pm 0/05)$	$0/44^a (\pm 0/11)$	$0/42^a (\pm 0/18)$
	FC	$0/201^a (\pm 0/08)$	$0/169^c (\pm 0/08)$	$0/175^b (\pm 0/07)$	$0/199^a (\pm 0/09)$	$0/176^b (\pm 0/07)$
	PWP	$0/05^a (\pm 0/01)$	$0/06^a (\pm 0/00)$	$0/05^a (\pm 0/01)$	$0/05^a (\pm 0/01)$	$0/06^a (\pm 0/03)$
	AWC	$0/151^a (\pm 0/07)$	$0/109^d (\pm 0/05)$	$0/125^b (\pm 0/04)$	$0/149^a (\pm 0/05)$	$0/116^c (\pm 0/05)$
۳	ρ_b	$1/26^b (\pm 0/09)$	$1/38^a (\pm 0/24)$	$1/33^a (\pm 0/11)$	$1/24^b (\pm 0/08)$	$1/29^b (\pm 0/16)$
	θ_s	$0/53^a (\pm 0/14)$	$0/49^a (\pm 0/10)$	$0/51^a (\pm 0/21)$	$0/54^a (\pm 0/05)$	$0/52^a (\pm 0/12)$
	FC	$0/254^a (\pm 0/10)$	$0/240^b (\pm 0/09)$	$0/242^b (\pm 0/17)$	$0/252^a (\pm 0/16)$	$0/228^c (\pm 0/11)$
	PWP	$0/09^a (\pm 0/04)$	$0/09^a (\pm 0/02)$	$0/09^a (\pm 0/05)$	$0/09^a (\pm 0/02)$	$0/07^a (\pm 0/04)$
	AWC	$0/164^a (\pm 0/10)$	$0/150^b (\pm 0/07)$	$0/152^b (\pm 0/04)$	$0/162^a (\pm 0/06)$	$0/158^b (\pm 0/11)$
۴	ρ_b	$1/34^a (\pm 0/18)$	$1/58^a (\pm 0/21)$	$1/51^a (\pm 0/23)$	$1/38^a (\pm 0/15)$	$1/41^a (\pm 0/09)$
	θ_s	$0/51^a (\pm 0/25)$	$0/42^b (\pm 0/17)$	$0/45^b (\pm 0/20)$	$0/50^a (\pm 0/33)$	$0/48^a (\pm 0/14)$
	FC	$0/240^a (\pm 0/10)$	$0/221^c (\pm 0/07)$	$0/235^a (\pm 0/10)$	$0/244^a (\pm 0/17)$	$0/229^b (\pm 0/11)$
	PWP	$0/08^a (\pm 0/00)$	$0/08^a (\pm 0/02)$	$0/09^a (\pm 0/05)$	$0/08^a (\pm 0/05)$	$0/08^a (\pm 0/04)$
	AWC	$0/160^a (\pm 0/04)$	$0/141^c (\pm 0/05)$	$0/145^c (\pm 0/08)$	$0/164^a (\pm 0/10)$	$0/149^b (\pm 0/11)$

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف معیار داده‌هاست.



شکل ۳. منحنی مشخصه نمونه خاک‌های مورد بررسی (خاک ۱: رس و ماده آلی پایین، خاک ۲: رس پایین - ماده آلی بالا، خاک ۳: رس و ماده آلی بالا و خاک ۴: رس بالا - ماده آلی پایین) پس از چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن (بدون تر و خشک شدن T0؛ یک چرخه T1؛ سه چرخه T3 و پنج چرخه T5)

نتیجه‌گیری

سبب توزیع بیشتر اندازه ذرات در این خاک‌ها طی چرخه‌های تر و خشک‌شدن شد.

۳. مواد آلی از جمله عوامل مهم در تشکیل و پایداری ساختمان خاک است. مواد آلی با ایجاد پوشش‌های آب‌گریز در اطراف خاکدانه‌ها سبب کاهش سرعت نفوذ آب به درون خاکدانه‌ها شد و مقاومت آن‌ها را در تنش ناشی از خیس‌شدن افزایش می‌دهد.

۴. ارتباط افزایش چرخه‌های متوالی تر و خشک‌شدن با کاهش پایداری ساختمان در نمونه خاک‌ها را می‌توان به ایجاد درز و ترک‌های ریز در سطح خاکدانه‌ها نسبت داد.

۱. تر و خشک‌شدن تنش معمول و گسترده‌ای است که تقریباً همه خاک‌ها با آن مواجه می‌شوند و از مهم‌ترین فرایندهای محیطی است. چنانچه ترشدن به آهستگی صورت گیرد، معمولاً سبب افزایش خاکدانه‌سازی می‌شود.

۲. در خاک‌های بررسی‌شده، آثار چرخه‌های تر و خشک‌شدن در نمونه خاک‌های دارای رس بیشتر شدیدتر از نمونه خاک‌های دارای رس کمتر بود که بیانگر تأثیر مثبت رس در خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ است. در واقع، وجود رس بیشتر در نمونه خاک رسی، به علت ویژگی انقباض و انبساط بیشتر،

REFERENCES

- Angers, D.A. and Carter, M.R. (1996) Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. In Carter, M. R., Stewart, B. A. (eds): Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. CRC Press, p. 193–211.
- Black, G.R. and Hartge, K.H. (1986) Bulk density. In: Klute, A. (Ed.) "Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods". SSSA/ASA. Monograph 9. 2nd ed. pp: 347–380.
- Boravka, L., Valla, M., Donatova, H. and Nemecek, K. (1997) Vulnerability of soil aggregate in relation to soil properties. Czech University of Agriculture in Prague, Czech Republic.
- Clement, C.R. (1966) A simple and reliable tension table. J. Soil Sci. 17, 133–135.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. and Arrouays, D. (2000) Organic matter influence on clay wetability and soil aggregate stability. *Journal of Soil Science American Journal*, 64: 1479–1486.
- Defossez, P. and Richard, G. (2002) Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil and Tillage Research*, 67, 41–64.
- Dexter, A.R. 1988. Advanced in the characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11, 199–238.
- Dexter, A.R. and Kroesbergen, B. (1985) Methodology for determination of tensile strength soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31, 139-147.
- Dexter, A.R. and Watts, C.W. (2000) Tensile strength and friability. In: Smith, K.A. and Mullins, C.E. (Eds). Soil and Environmental Analysis: Physical Methods. 2nd Edition. Marcel Dekker, Inc. pp. 405–433.
- Elustondo, J., Angers, D.A., Laverdiere, M.R. and N'dayegamiye, A. (1990) Etude comparative de l'agrégation et de la matière organique associée aux fractions granulométriques de sept soils sous culture de maïs ou en prairie. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 395–402.
- Franzluebbers, A.D. (2002) Water infiltration and soil structure related to organic matter and stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 66, 197–205.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986) Particle-size distribution. PP. 384-411. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed., Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Grant, C.D., Dexter, A.R. and Oades, J.M. (1992) Residual effects of additions of calcium compounds on soil structure and strength. *Soil and Tillage Research*, 22: 283–297.
- Horn, R., and Dexter, A.R. (1989) Dynamic of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research*, 13, 253–266.
- Kay, B.D. (1990) Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Advanced Soil Science*, 12, 1–52.
- Khazaei, A., Mosaddeghi, M.R. and Mahboubi, A. (2008) Test conditions, and soil organic matter, clay and calcium carbonate contents' impacts on mean weight diameter and tensile strength of aggregates from some Hamadan soils. *Journal of Agricultural and Natural Resource Sciences and Technology of IUT*. 44: 123–135 (In Farsi).
- Klute, A. (1986) Water retention: laboratory methods. In: Klute A (Ed.) Methods of Soil Analysis: Part I. Physics and Mineralogy Methods, 2nd ed. Agronomy Monograph, ASA, WI, pp. 635– 662.
- Le Bissonnais, Y. and Singer, M.J. (1993) Seal formation, runoff and interrill erosion from seventeen California soils. *Journal of Soil Science American Journal*, 57: 224–229.
- Lynch, J.M. and Bragg, E. (1985) Microorganisms and aggregate stability. *Advances in Soil Science*, 2: 133–171.
- McKenzie, B.M. and Dexter, A.R. (1987) Physical properties of casts of the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology and Fertility of Soils*, 5, 152–157.
- Newman, A.C.D. and Thomasson, A.J. (1979) Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *Journal of Soil Science*, 30, 415–439.

- Pagliai, M., La Marca, M. and Lucamante, G. (1987) Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. *Soil Science*, 144, 128–140.
- Pillai, U.P. and McGarry, D. (1999) Structure repair of a compacted Vertisol with wet–dry cycles and crops. *Journal of American Society of Agronomy*, 63, 201–210.
- Pires, L.F., Bacchi, O.O.S. and Reichardt, K. (2004) Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. *Australian Journal of Soil Research*, 42, 857–863.
- Pires, L.F., Bacchi, O.O.S. and Reichardt, K. (2007) Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis. *Soil and Tillage Research*, 94, 537–545.
- Rahimi, H., Pazira, E. and Tajik, F. (2000) Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research*, 54, 145–153.
- Rhoades, J.D. (1996) Salinity electrical conductivity and total dissolved solid. In: Page, A.L., Somner, C.E. and Nelson, P.W. (Eds.) "Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods". ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. pp: 417–436.
- Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Voroney, P., Unc A. and Sayyad, Gh. (2011) Bacterial filtration rates in repacked and weathered soil columns. *Geoderma*, 167/168: 204–213.
- Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Unc, A., Voroney P. and Heydari, A. (2012a) Effect of regenerated soil structure on unsaturated transport of *Escherichia coli* and bromide. *Journal of Hydrology*, 430–431, 80–90.
- Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Voroney, P., Unc, A. and Khodakaramian, Gh. (2012b) Significance of physical weathering of two-texturally different soils for the saturated transport of *E. coli* and bromide. *Journal of Environmental Management*, 107, 147–158.
- Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A. and Yousefi, G. (2012c) Effects of Wetting/Drying, Freezing/Thawing and Earth Worm Activities on Soil Hydraulic Properties. *Journal of Water and Soil*, 26(2) 340–348 (In Farsi).
- Shainberg, I., Rhoades J.D. and Prather, R.J. (1981) Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of solid soils. *Soil Science Society American Journal*, 45, 273–277.
- Shiel, R.S., Adey, M.A. and Lodder, M. (1988) The effect of successive wet/dry cycles on aggregate size distribution in a clay texture soil. *Journal of Soil Science*, 39, 71–80.
- Sullivan, L.A. (1990) Soil organic matter, air encapsulation and water-stable aggregation. *Journal of Soil Science*, 41, 529–534.
- Telfair, D., Gardner M.R. and Miars, D. (1957) The restoration of a structurally degenerated soil. *Soil Science Society American Journal*, 21, 131–134.
- Tiplittgr, G.B.D., Vandoren B. and Schimdt, B.L. (1968) Effect of corn stUtomo, W.H. and A.R. Dexter. 1982. Change in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-structured soil. *Journal of Soil Science*, 33, 623–637.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. In: Page, A.L., Sommer, C.E. and Nelson, P.W. (Eds.). "Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods". ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. pp: 475–490.
- Utomo, W.H. and Dexter, A.R. (1981) Age hardening of agricultural top soils, *Journal of Soil Science*, 32, 335–350.
- Utomo, W.H. and A.R. Dexter. 1982 Changes in soil aggregate water stability induced by wetting drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Science*, 33, 623–637.
- Vogel, H.J. and Roth, K. (2003) Moving through scales of flow and transport in soil. *Journal of Hydrology*, 272, 95–106.
- Walkley, A. and Black, I.A. (1934) An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science*, 37, 29–38.
- Watts, C.W., Whalley, W.R., Longstaff, D.J., White, R.P., Brookes, P.C. and Whitmore, A.P. (2001) Aggregation of a soil with different cropping histories following the addition of organic materials. *Soil Use Management*, 17, 263–268.
- Yoder, R.E. (1936) A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, 28, 337–351.
- Zhang, B., Horn, R. and Hallett, P. D. (2005) Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society American Journal*, 69, 864–871.
- Zund, P.R., Pillai-McGarry, U., McGarry, D. and Bray, S.G. (1997) Repair of a compacted Oxisol by the earthworm *pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae Oligochaeta). *Biology and Fertility of Soils*, 25, 202–208.