

تأثیر شرایط آزمایش، مقدار ماده آلی، رس و کربنات کلسیم خاک بر میانگین وزنی قطر و مقاومت کششی خاکدانه‌ها در برخی از خاک‌های استان همدان

علی خزائی، محمد رضا مصدقی* و علی اکبر محبوی^۱

(تاریخ دریافت: ۸۵/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۲/۷)

چکیده

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و شرایط آزمایش بر پایداری ساختمان خاک مؤثرند. در این پژوهش اثر شرایط آزمایش در کنار ویژگی‌های ذاتی بر پایداری خاکدانه‌های شماری از خاک‌های استان همدان به کمک روش الک تر و اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها بررسی شد. از دو شاخص میانگین وزنی قطر (MWD) و مقاومت کششی (Y) خاکدانه‌ها برای بیان پایداری ساختمان خاک استفاده شد. در روش الک تر و با استفاده از پیش-تیمار مرطوب کردن آهسته، سه زمان متفاوت (۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه) الک کردن خاکدانه‌ها در آب به منظور اعمال تنش‌های مکانیکی-آلی در نظر گرفته شد. مقاومت کششی خاکدانه‌ها نیز در دو شرایط رطوبتی هوایشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa به روش غیرمستقیم برزیلی اندازه‌گیری شد. با توجه به پایداری ساختمانی نسبتاً ضعیف خاک‌های همدان که از ویژگی‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است، زمان‌های کوتاه الک کردن خاکدانه‌ها برای تشخیص تغییرات پایداری ساختمان ناشی از ویژگی‌های ذاتی مناسب تر بود. در بین ویژگی‌های مؤثر بر MWD، بیشترین نقش مربوط به ماده آلی بود. از سه ویژگی ذاتی ماده آلی، رس و کربنات کلسیم که اثر آنها بر Y خاکدانه‌ها بررسی شد، تأثیر ماده آلی به مراتب بیشتر از دو ویژگی دیگر بود. بالاترین ضریب تبیین (R^2) برای رابطه Y خاکدانه‌ها با سایر ویژگی‌های خاک بیشتر قابل توجه است. نتایج این پژوهش، زمان‌های کوتاه الک کردن (۵ دقیقه در الک تر) و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa را برای اندازه‌گیری مقاومت کششی برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک‌های استان همدان توصیه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پایداری ساختمان خاک، الک تر، روش برزیلی، مکش ماتریک، بافت خاک، ماده آلی، کربنات کلسیم

مقدمه

ذرات جامد و منافذ بین آنها در کنار یکدیگر گفته می‌شود (۸). چگونگی هم‌آرایی ذرات، تابعی از عوامل متغیر و تأثیرگذار بر شکل‌گیری واحدهای اولیه ساختمان (یعنی خاکدانه) است، که موجب تنوع و تفاوت‌های زیادی در ساختمان خاک‌ها می‌شود (۱۸).

ساختمان خاک از راه تأثیر بر چرخه کربن و سایر عناصر

ذرات خاک به ندرت به‌طور منفرد و جدا از هم یافت می‌شوند. عوامل زیادی ذرات منفرد را به هم پیوند داده و طی فرایندی پیچیده و تحت تأثیر عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، هم‌آرایی از ذرات شکل می‌گیرد که ساختمان خاک نامیده می‌شود. ساختمان خاک به ترتیب قرار گرفتن

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بولوی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mosaddeghi@Basu.ac.ir

برابر تنش ناشی از خیس شدن سریع می‌شود. ترنان و همکاران (۳۲) از رس به عنوان یک ملات بین ذرات خاک نام بده و دریافتند که با افزایش مقدار رس، پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابد. رازیا و کی (۲۹) دریافتند که پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر، با افزایش مقدار رس خاک افزایش می‌یابد. آنها گزارش کردند که رس به عنوان عامل مهمی در پیوند دادن ذرات اولیه خاک به همدیگر و تشکیل خاکدانه‌ها عمل می‌کند.

یاداو و گردهار (۳۵) به نقش مثبت کربنات کلسیم در پایداری ساختمان خاک‌های آهکی پی بردن. شاینبرگ و همکاران (۳۱) مقادیر مختلفی کربنات کلسیم به خاک اضافه کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار کربنات کلسیم، پایداری ساختمان خاک افزایش می‌یابد. کربنات کلسیم مانند ملاتی بین ذرات خاک می‌تواند رسوب کند و سبب اتصال ذرات خاک شود. همچنین یون کلسیم ناشی از انحلال آن با هماوری ذرات و به طور غیر مستقیم با تأثیر بر فعالیت ریزجانداران خاک، ساختمان‌سازی را تقویت می‌کند. هیل و اسپوزیتو (۱۶) و کرتین و همکاران (۷) مشاهده کردند که افزایش غلظت یون کلسیم در محلول خاک باعث کاهش پراکنش ذرات رس خاک می‌شود. نادرل و همکاران (۲۴) نتیجه گرفتند که افزودن کربنات کلسیم به خاک‌های سدیمی از راه آب آبیاری، منجر به اصلاح و افزایش پایداری ساختمان آنها می‌شود.

روش‌ها و شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک پیشنهاد شده است. این روش‌ها بر اساس شرایط مختلف خاک‌ها و بر حسب اهداف متفاوت ارائه شده‌اند. یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، بررسی توزیع اندازه خاکدانه‌هاست. توزیع اندازه خاکدانه‌ها معمولاً به کمک دو روش الک تر (Wet sieving) و الک خشک (Dry sieving) (اندازه‌گیری می‌شود. روش الک خشک بیشتر برای بررسی تأثیر خاکورزی بر خرد و نرم شدگی خاک (Soil crumbling)

غذایی، دریافت، ذخیره و انتقال آب در خاک، مقاومت در برابر فرسایش، هدایت هیدرولیکی، تهويه، گرمای خاک و همچنین از راه تأثیر بر مقاومت مکانیکی خاک و انتشار عناصر غذایی بر رشد گیاه و تولید محصول اثر می‌گذارد. واژه پایداری ساختمان خاک (Soil structural stability) به توانایی یک خاک در نگهداری آرایش ذرات جامد و فضای بین آنها در هنگام مواده شدن با تنش‌های مختلف مربوط می‌شود (۱). پایداری ساختمان خاک به نوع تنش اعمال شده وابسته است. تنش‌ها ممکن است ناشی از خاکورزی، تردد ماشین‌های کشاورزی و یا خشک و مرطوب شدن خاک باشند.

دو دسته از عوامل بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارند که عبارت‌اند از: ویژگی‌های ذاتی خاک و فاکتورهای خارجی. در گروه اول می‌توان به تأثیر ویژگی‌های محلول خاک (مانند ESP، SAR، pH)، نوع کانی‌های رسی، میزان کربنات و سولفات کلسیم، میزان ماده آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم اشاره نمود. از جمله فاکتورهای خارجی، می‌توان اقلیم، مکان، فصل، مدیریت زراعی و خاکورزی را نام برد (۱ و ۴).

افزودن ماده آلی به خاک باعث بهبود رشد و نمو گیاهان می‌شود که این امر در بیشتر مواقع به دلیل بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد. از جمله ویژگی‌های فیزیکی خاک که به شدت تحت تأثیر ماده آلی قرار می‌گیرد، ساختمان خاک است. افزودن بقایای گیاهی تازه به خاک و همچنین ترشحات میکروبی، باعث چسبیدن ذرات به همدیگر شده و به پایداری خاکدانه‌ها کمک می‌کند. لینچ و برگ (۲۰) نشان دادند که مواد آلی خاک هم در تشکیل و هم در پایداری خاکدانه‌ها تأثیر مثبت دارند، به‌طوری که با افزایش ماده آلی خاک، پایداری مرطوب خاکدانه‌ها (Wet aggregate stability) افزایش می‌یابد. مونییر (۲۱) و کوییرک و مورای (۲۸) دریافتند که ماده آلی با ایجاد پوششی آب گریز (Hydrophobic coating) در اطراف خاکدانه‌ها باعث کاهش سرعت نفوذ آب به درون خاکدانه‌ها و افزایش مقاومت آنها در

روش یا روش‌هایی مناسب برای ارزیابی پایداری ساختمان و رابطه آن با ویژگی‌های ذاتی در برخی از خاک‌های استان همدان (با اقلیم نیمه خشک) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

پس از بررسی نقشه‌های خاک، ۲۱ خاک از سری‌های مهم خاک‌های زراعی استان همدان گزینش شد. خاک‌های به گونه‌ای انتخاب شدند که دارای دامنه نسبتاً وسیعی از بافت، مقدار ماده آلی و مقدار کربنات کلسیم بوده و غیرشور و غیرسدیمی باشند (جدول ۱). در پاییز ۱۳۸۴، نمونه خاک‌ها از لایه ۰-۵۰ سانتی‌متری برداشت شده، به آزمایشگاه منتقل گردیده و هوا-خشک شدند. نمونه‌برداری به گونه‌ای انجام شد که کمترین تغییرشکل و تخربی در خاک‌دانه‌ها رخ دهد. ویژگی‌های خاک شامل توزیع اندازه ذرات اولیه و بافت به روش پیپت (۱۳)، مقدار ماده آلی به روش اکسیداسیون تر، مقدار کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی و رسانایی الکتریکی و واکنش گل اشیاع خاک‌ها به ترتیب به وسیله EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند (۲۶).

برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، از روش الکتریکی سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و کورس ۱/۳ سانتی‌متر و به شیوه مرطوب کردن آهسته استفاده شد (۱۸). نمونه خاک‌های هوا-خشک شده به آرامی از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند. سپس ۵۰ گرم خاک سرنده شده (۰-۸ mm) برداشته شده و روی یک دستمال پارچه‌ای در کف یک ظرف شیشه‌ای ریخته شد. با استفاده از یک پل آبی، رطوبت نمونه خاک‌ها به آهستگی و به روش مویینه‌ای به رطوبت نظیر مکش ماتریک ۲۰۰ kPa رسانده شد (شکل ۱). دلیل افزایش رطوبت خاک‌ها به رطوبت نظیر مکش ماتریک ۲۰۰ kPa، آن بود که خاک‌های کشاورزی در شرایط طبیعی تا شرایط هوا-خشک، خشک نمی‌شوند بلکه تا مکش‌هایی که احتمالاً حداقل آن حدود ۲۰۰ kPa است، رطوبت آنها کاهش می‌یابد. مقدار آب مورد نیاز برای افزایش رطوبت خاک با استفاده از دستگاه صفحه فشار (Pressure plate apparatus) (۱۹)، اندازه‌گیری، محاسبه و در چند مرحله به آهستگی در

و ارزیابی فرسایش‌پذیری بادی خاک به کار می‌رود (۱۸)؛ ولی روش الکتریکی عموماً برای تعیین پایداری خاک‌دانه‌های درشت در برابر تنش‌های آبی استفاده می‌شود. روش دیگر برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک در برابر تنش‌های مکانیکی، اندازه‌گیری مقاومت کششی (Tensile strength) خاک‌دانه‌هاست که توسط دکستر و کروسبرگن (۹) پیشنهاد شد.

شرایط رطوبتی و روش مرطوب کردن نمونه‌های خاک پیش از انجام آزمایش، بر مقدار پایداری آنها تأثیرگذار است. دیکسون و همکاران (۱۰) و بیر و بروس (۳) به این نتیجه رسیدند که شرایط رطوبتی متفاوت نمونه‌های خاک پیش از انجام آزمایش، به نتایج مختلفی از پایداری ساختمان خاک منتهی می‌شود. نگهداری نمونه‌ها در گنجایش زراعی (FC)، ارزیابی درست‌تری از رفتار خاک در برابر تنش‌های اعمال شده به آن دارد، اما امکان مقایسه با خاک‌هایی که در سایر شرایط رطوبتی قرار دارند را محدود می‌سازد. به نظر می‌رسد شرایط هوا-خشک امکان این مقایسه را بهتر از سایر رطوبت‌ها فراهم می‌کند (۵). هر چند رطوبت هوا-خشک برای آزمایش‌های تعیین پایداری ساختمان خاک مناسب‌تر است، اما انتخاب پیش-تیماره‌ای رطوبت خاک بیشتر، به شبیه‌سازی شرایط واقعی رطوبتی خاک در مزرعه کمک می‌کند. جاسترو و میلر (۱۷) نشان دادند که مرطوب کردن سریع (Fast wetting) در به خردشدن خاک‌دانه‌ها در نتیجه جبس ناگهانی هوا در منافذ آنها می‌شود. الیوت (۱۱) و رابرنسون و همکاران (۳۰) به این نتیجه رسیدند که مرطوب کردن آهسته (Slow wetting) در مقایسه با مرطوب کردن سریع، باعث تخربی کمتر خاک‌دانه‌ها می‌شود. مرطوب کردن آهسته به دلیل اثر کمتر هوای محبوس و انبساط کندر و همگن‌تر خاک‌دانه‌ها باعث تخربی کمتر ساختمان خاک می‌شود.

در کشور ما، مطالعه کمی و گستردگی چندانی در رابطه با روش‌های ارزیابی پایداری ساختمان خاک انجام نگرفته و اکثرآ از روش‌های پیشنهاد شده برای خاک‌های پایدار مناطق مرطوب و نیمه مرطوب استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش ارائه



شکل ۱. پل آبی برای انتقال آب به ظرف دارای خاکدانه‌ها

اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها (۹) در رطوبت هوا-خشک و مکش ماتریک 500 kPa استفاده شد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که به دلیل پایداری اندک خاک‌های مورد بررسی، مقاومت کششی خاکدانه‌ها در مکش‌های ماتریک کمتر از 50 kPa ناچیز بوده و تغییر‌شکل آنها عمدتاً خمیری و ماندگار می‌باشد که با اصول روش غیرمستقیم برزیلی مغایرت دارد. خاکدانه‌های با اندازه $6/3-8 \text{ mm}$ به روش الک خشک جدا شده و 30 عدد از آنها به طور تصادفی برای هر آزمایش انتخاب و وزن شدند. برای تیمار مکش ماتریک 500 kPa 30 عدد از خاکدانه‌های مذکور انتخاب شده و مکش ماتریک آنها با استفاده از پل آبی (شکل ۱) به 500 kPa رسانده شد. خاکدانه‌ها بین دو صفحه بارگذاری (با استفاده از دستگاه تک محوری (Uniaxial compression test)) شکسته شده و مقاومت کششی آنها به کمک رابطه زیر محاسبه شد:

$$Y = \frac{0.576 F}{d_{\text{eff}}^2} \quad [2]$$

که در این رابطه F نیروی فشاری مورد نیاز برای شکستن خاکدانه با قطر مؤثر (Effective diameter) (d_{eff}) و Y مقاومت کششی خاکدانه می‌باشد (۹). قطر مؤثر هر خاکدانه (d_{eff}) با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$d_{\text{eff}} = d_0 \left(\frac{M_a}{M_o} \right)^{1/33} \quad [3]$$

که در این رابطه d_0 قطر متوسط خاکدانه‌ها، M_a میانگین جرم

ظرف مجاور ریخته شد. برای کنترل رطوبت نمونه‌ها پس از مرطوب کردن آهسته، خاکدانه‌ها (پیش از آزمایش الک تر) توزین شدند.

خاک‌های پیش-مرطوب شده روی یک سری الک (به ترتیب از بالا به پائین $4, 1, 2, 0/5, 0/25$ و $0/05$ میلی‌متر) ریخته شدند. سه زمان متفاوت $5, 10$ و 15 دقیقه برای الک کردن خاکدانه‌ها در آب شهر در نظر گرفته شد. زمان تکان دادن الک‌ها در آب بیانگر مقدار انرژی واردہ به خاکدانه‌هاست. پس از پایان زمان تکان دادن، الک‌ها را به آرامی از آب خارج کرده و خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک، در آون در دمای 105 درجه سانتی‌گراد خشک و سپس وزن شدند. در نهایت میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (Mean weight diameter, MWD) به کمک فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n w_i \bar{X}_i \quad [1]$$

که در این رابطه n تعداد دامنه اندازه خاکدانه (در اینجا 6 عدد)، \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) می‌باشد. هر خاک برای سه زمان تکان دادن و در سه تکرار آزمایش شد. جملاً تعداد آزمایش‌های الک تر 189 آزمایش (21×3 خاک \times زمان تکان دادن \times ۳ تکرار) بود.

از روش غیرمستقیم برزیلی (Indirect Brazilian test) برای

دقیقه، به دلیل داشتن بالاترین انحراف معیار، مناسب‌ترین زمان برای الک‌کردن خاکدانه‌ها در آب است، چون در این زمان تفاوت بین خاک‌ها از نظر پایداری ساختمان بهتر از سایر زمان‌ها مشخص شده است. مقادیر ضریب تغییرات MWD نیز مؤید همین مطلب است. وايت (۳۴) نشان داد که با افزایش زمان الک کردن خاکدانه‌ها، مقدار پایداری آنها کاهش می‌یابد. کول (۶) و هال و همکاران (۱۵) از یک دامنه وسیع زمان الک کردن (۵ تا ۶۰۰۰ ثانیه) استفاده کرده و در تمامی موارد کاهش مقدار MWD با افزایش زمان الک کردن را گزارش کردند. پانابوک و کوئیک (۲۷) نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش زمان الک کردن، MWD کاهش می‌یابد.

ارتباط بین پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های ذاتی خاک
ارتباط بین پایداری خاکدانه‌ها (MWD) و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی برای زمان‌های الک کردن در آب در معادله‌های ۱ تا ۶ نشان داده شده که تمامی آنها در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند:

$$MWD_5(\text{mm}) = 2/18 + 0/307 \text{ OM\%} + 0/011 \text{ Clay\%} + 0/015 \text{ CaCO}_3\% \quad R^2 = 0/65 \quad [4]$$

$$MWD_{10}(\text{mm}) = 2/30 + 0/224 \text{ OM\%} + 0/008 \text{ Clay\%} + 0/007 \text{ CaCO}_3\% \quad R^2 = 0/64 \quad [5]$$

$$MWD_{15}(\text{mm}) = 1/99 + 0/233 \text{ OM\%} + 0/010 \text{ Clay\%} + 0/009 \text{ CaCO}_3\% \quad R^2 = 0/64 \quad [6]$$

در این روابط MWD_5 ، MWD_{10} و MWD_{15} به ترتیب نشان‌دهنده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه الک کردن در آب است. در معادله‌های فوق OM%， Clay% و CaCO3% به ترتیب بیانگر درصدهای ماده آلی، رس و کربنات کلسیم خاک می‌باشند. با توجه به معادله‌های به دست آمده بالاترین ضریب تیگین (R^2) برای زمان

۳۰ عدد خاکدانه و M_a ، جرم خاکدانه مورد نظر می‌باشد (۹). برای هر خاک ۶۰ عدد خاکدانه با دو شرایط رطوبتی آزمایش شد. جمعاً تعداد ۱۲۶۰ آزمایش مقاومت کششی خاکدانه انجام شد (۲۱ خاک \times ۲ رطوبت \times ۳۰ خاکدانه).

برای شناخت و بررسی عوامل مهم مؤثر بر پایداری ساختمان خاک‌های مورد بررسی، روابط رگرسیونی خطی و چندگانه بین MWD (متوسط سه تکرار) یا Z (متوسط ۳۰ تکرار) و درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم خاک با استفاده از نرم افزار Minitab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل‌ها به کمک برنامه Excel رسم شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ مکان نمونه‌برداری، رده‌بندی، طول و عرض جغرافیایی، مقادیر ماده آلی، رس و کربنات کلسیم خاک‌های مورد بررسی به همراه مقدار شاخص‌های پایداری ساختمان MWD و Z آنها و انحراف معیار و ضریب تغییرات هر کدام آورده شده است. خاک‌های مورد بررسی دامنه نسبتاً وسیعی از پایداری ساختمان (MWD و Z) دارند.

اثر تنفس واردۀ در روش الک تر بر پایداری خاکدانه‌ها دامنه تغییرات MWD در خاک‌های مورد بررسی در زمان‌های تکان دادن ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه به ترتیب: $2/35-3/55 \text{ mm}$ ، $2/50-3/64 \text{ mm}$ و $2/60-4/10 \text{ mm}$ بود. مقادیر MWD به دست آمده در این روش (مرطوب کردن آهسته) در مقایسه با مقادیر MWD ناشی از روش مرطوب کردن سریع (نتایج ارانه نشده است) بیشتر می‌باشد.

با افزایش زمان تکان دادن الک‌ها در آب (افزایش تنفس‌های مکانیکی-آلی)، مقادیر MWD کاهش یافت (جدول ۱). مقدار میانگین MWD به ترتیب برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه، $3/35$ ، $3/56$ و $2/90 \text{ mm}$ به دست آمد. با توجه به مقادیر انحراف معیار به دست آمده برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه (به ترتیب $0/38$ ، $0/26$ و $0/30 \text{ mm}$) می‌توان گفت که زمان ۵

جدول ۱. برخی از پرتوگاه‌ها و پایداری خاکدانه‌های خاک‌های موربد بررسی^۱

شماره نک	محل	ردیفه برداری	جهنم‌برانگی	رس	طول و عرض	گرهنگات	MWD ₅	MWD ₁₀	Y _{air-dry}	Y _{500 kPa}
۱	خمین‌آباد	آقابناباغی	Typic Halaquepts	۴۸°۰'۲۰" E, ۳۴°۰'۰" N	۲۹/۰	۲۱/۰	۰/۵۶	۰/۵۵	۲/۵۰	۲/۵۰
۲	سیاه‌گله	سیاه‌گله	Typic Xerochepts	۴۸°۰'۲۰" E, ۳۴°۰'۱" N	۲۹/۰	۱/۳۰	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۳	پاوه	پاوه	Endoaquepts	۴۷°'۱۲" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۴	قاسم‌آباد	قاسم‌آباد	Typic Haploixeralfs	۴۸°۰'۵۸" E, ۳۴°۰'۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۵	چمن‌آباد	چمن‌آباد	Typic Calcixeralfs	۴۱' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۶	نجف‌آباد	نجف‌آباد	Typic Haploixeralfs	۴۴' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۷	موسی‌آباد	موسی‌آباد	Aeric Haplaquepts	۴۹' ۰" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۸	وشنارآباد	وشنارآباد	Aeric Halaquents	۴۱' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۹	گردنه	گردنه	-	۴۱' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۱۰	صلح‌آباد	صلح‌آباد	-	۴۸°۰'۲۱" E, ۳۴°۰'۰" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۱۱	موسی‌آباد	موسی‌آباد	Aeric Haplaquepts	۴۳' ۰' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰
۱۲	نجف‌آباد	نجف‌آباد	Typic Calcixeralfs	۳۹' ۱" N	۲۹/۰	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۷۵	۲/۷۰	۲/۷۰

اداوه حلولی

در جدول ۱ آورده شده است. دامنه تغییرات γ در خاک‌های مورد بررسی برای شرایط رطوبتی هوا-خشک و مکش ماتریک 500 kPa به ترتیب $82-175 \text{ kPa}$ و $26-38 \text{ kPa}$ بود.

در مکش‌های ماتریک پائین‌تر از 50 kPa ، خاکدانه‌های خاک‌های مورد بررسی رفتار خمیری داشته و گسیختگی ترد در آنها رخ نداد. در حالی که خاک‌های مناطق مرطوب و نیمه-مرطوب دنیا از پایداری ساختمانی بالاتری برخوردارند. کاسارانو (۵) برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌های خاک‌های انگلستان از مکش‌های ماتریک کمتر از 100 kPa استفاده کرد. مانکهم و همکاران (۲۳) مقاومت کششی خاکدانه‌های خاک‌های دانمارک را در مکش‌های ماتریک 30 و 10 kPa اندازه‌گیری کردند.

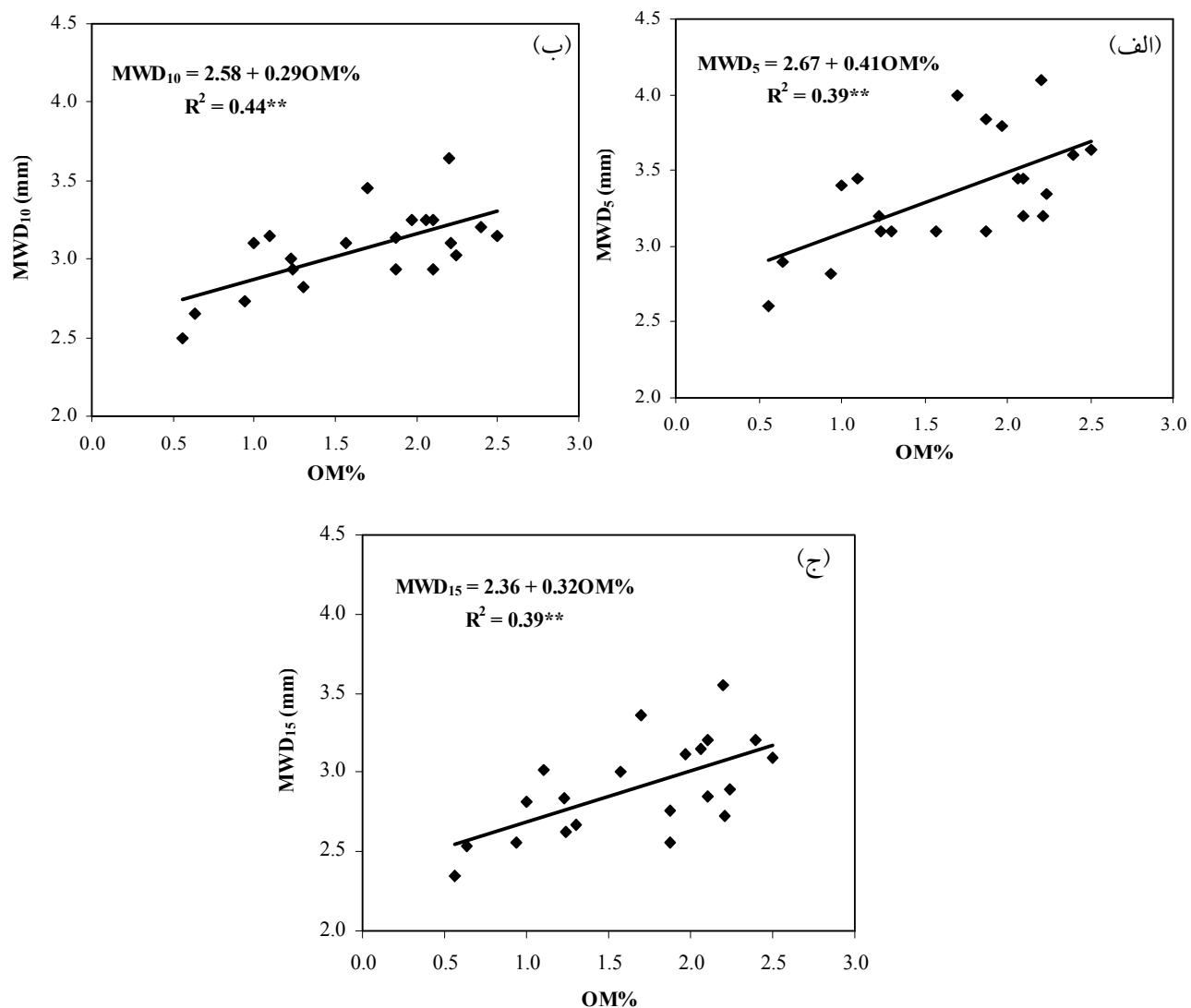
با کاهش مکش ماتریک خاک، γ خاکدانه‌ها کاهش یافت (جدول ۱). مقدار میانگین γ در رطوبت هوا-خشک بیش از 4 برابر مقدار میانگین γ آنها در مکش ماتریک 500 kPa بود. فارل و همکاران (۱۲) دریافتند که با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقاومت کششی خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. در واقع افزایش رطوبت خاک باعث ضعیف شدن پیوند بین ذرات خاکدانه‌ها شده و مقاومت کششی آنها را کاهش می‌دهد. گوئیف (۱۴) و کاسارانو (۵) نیز گزارش کردند که با افزایش رطوبت خاک، مقدار مقاومت کششی آن به طور خطی کاهش می‌یابد. کاسارانو (۵) یک رابطه خطی منفی با ضریب تبیین بالا $R^2 = 0.95$ بین مقاومت کششی و مقدار رطوبت خاک به دست آورد. مانکهم و همکاران (۲۲) خاکدانه‌ها را به چهار وضعیت رطوبتی هوا-خشک و مکش‌های ماتریک 100 ، 30 و 10 kPa رسانده و نشان دادند که بیشترین مقاومت کششی را خاکدانه‌های هوا-خشک و پس از آن به ترتیب، خاکدانه‌های با مکش‌های ماتریک 100 ، 30 و 10 kPa داشتند.

ارتباط بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها و ویژگی‌های ذاتی خاک ارتباط بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی برای شرایط رطوبتی هوا-خشک و

۵ دقیقه به دست آمده است. در واقع بیشترین همبستگی بین MWD و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی (درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم) در زمان‌های کوتاه‌الک کردن (۵ دقیقه) به دست آمد. همچنین با توجه به معادله‌های 4 تا 6 مشخص می‌شود که بیشترین نقش در پایداری خاکدانه‌ها و مقدار MWD خاک‌های مورد بررسی را ماده آلی ایفا می‌کند. مثلاً برای زمان 5 دقیقه، می‌توان گفت که تأثیرگذاری ماده آلی بر مقدار MWD حدود 28 برابر رس و 20 برابر کربنات کلسیم است. با افزایش زمان الک‌کردن، مقدار ضریب (نقش) ماده آلی در پایداری خاکدانه‌ها از 0.307 به 0.233 کاهش یافت. نقش کربنات کلسیم با افزایش زمان الک کردن، مانند نقش ماده آلی روند کاهشی داشت. در حالی که نقش رس با افزایش زمان الک کردن تغییرات چندانی نداشت. در این مورد اودز (۲۵) نشان داد خاک‌هایی که دارای مقدار رس زیاد هستند، با گذشت زمان پایداری ساختمان آنها کم نمی‌شود. او نشان داد که رس‌ها با مواد آلی تشکیل (Organoo-mineral complexes) مجموعه‌های معدنی-آلی (Organomineral complexes) می‌دهند که به تجزیه مقاوماند.

ماده آلی از بین سه ویژگی، مهم‌ترین نقش را در پایداری ساختمان خاک داشت که به طور جداگانه اثر آن بر مقدار MWD بررسی می‌گردد. در شکل ۲ روابط برازش خطی MWD با درصد ماده آلی خاک نشان داده شده که تمامی آنها در سطح آماری 1 درصد معنی‌دار می‌باشند. مقدار ماده آلی خاک به تنها یک تووانسته است حدود 40 درصد تغییرات MWD را توجیه کند. با افزایش انرژی واردہ به خاکدانه‌ها (زمان تکان دادن)، نقش ماده آلی (شیب خط برازش) در MWD کاهش یافت (شکل ۲). در واقع می‌توان گفت که تأثیر ماده آلی بر پایداری ساختمان خاک در زمان‌های کوتاه‌الک‌کردن (تنشی‌های کم)، بیشتر قابل توجه است.

اثر شرایط رطوبتی بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها
مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها (γ) در شرایط رطوبتی هوا-خشک و مکش ماتریک 500 kPa برای خاک‌های مورد بررسی



شکل ۲. رابطه بین پایداری خاکدانه‌ها (MWD) و درصد ماده آلی خاک (OM%) برای زمان‌های الک کردن در آب:
الف) ۵ دقیقه، ب) ۱۰ دقیقه و ج) ۱۵ دقیقه.

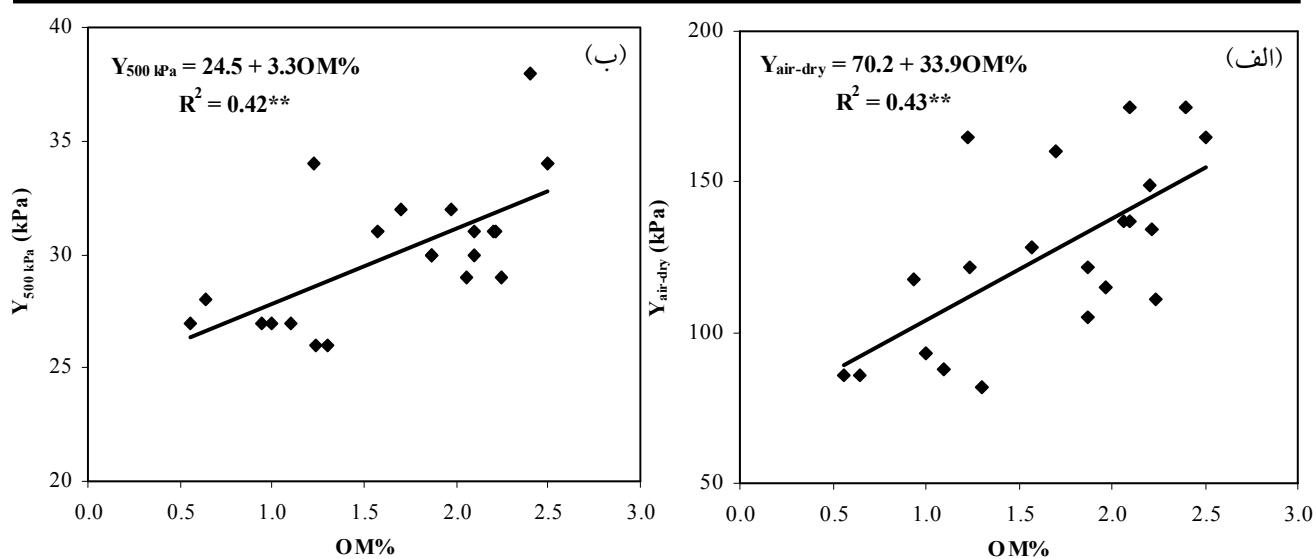
کششی خاکدانه‌ها در حالت هوا- خشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa است. مشاهده می‌شود که بالاترین ضریب تیبین (R^2) به ۵۰۰ kPa مربوط است. در واقع بهترین (قوی‌ترین) رابطه مقاومت کششی خاکدانه‌ها با ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی برای مکش ماتریک ۵۰۰ kPa به دست آمده شد. هم‌چنین بیشترین نقش در Y خاکدانه‌ها را ماده آلی خاک ایفا می‌کند. با کاهش مکش ماتریک خاک، مقدار ضریب (نقش) ماده آلی در مقاومت کششی (پایداری) خاکدانه‌ها به شدت کاهش

مکش ماتریک ۵۰۰ kPa در معادله‌های ۷ و ۸ ارائه شده که در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند:

$$Y_{\text{air-dry}} (\text{kPa}) = ۳۸/۲ + ۳۲/۲ \text{ OM\%} + ۰/۸۳ + \text{Clay\%} ۰/۴۶ \text{ CaCO}_3 \text{\%} \quad R^2 = ۰/۷۱ \quad [V]$$

$$Y_{500 \text{ kPa}} (\text{kPa}) = ۲۰/۱ + ۲/۷ \text{ OM\%} + ۰/۱۳ + \text{Clay\%} + ۰/۰۸ \text{ CaCO}_3 \text{\%} \quad R^2 = ۰/۸۴ \quad [A]$$

در این روابط $Y_{\text{air-dry}}$ و $Y_{500 \text{ kPa}}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت



شکل ۳. رابطه بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها (Y) و درصد ماده آلی خاک (OM%) در شرایط رطوبتی:

(الف) هوای-خشک و (ب) ۵۰۰ kPa

توانسته است ۴۲ و ۴۳ درصد تغییرات $Y_{\text{air-dry}}$ و $Y_{500 \text{ kPa}}$ را توجیه کند. میزان اثر ماده آلی (شیب رابطه برآش) بر مقاومت مکانیکی (Y) خاکدانه‌ها با افزایش مقدار رطوبت خاک به شدت کاهش یافته است. واتز و دکستر (۳۳) دریافتند که با افزایش مقدار ماده آلی، مقاومت کششی خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. آنها خاک‌هایی با مدیریت‌های مختلف را بررسی کرده و نشان دادند که ماده آلی تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت کششی خاکدانه‌ها دارد. هم‌چنین کاسارانو (۵) نیز به این نتیجه رسید که مقدار ماده آلی خاک نقش مثبتی در مقاومت کششی خاکدانه‌ها دارد. او نشان داد که خاکدانه‌های خاک‌های رویین با ماده آلی زیاد نسبت به خاکدانه‌های خاک‌های زیرین مقاومت کششی بالاتری دارند. او هم‌چنین گزارش کرد با افزایش مقدار رس خاک، Y خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از پیش-تیمار مرطوب کردن آهسته در اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک نسبت به پیش-تیمار مرطوب کردن سریع، باعث از هم گسیختگی کمتر خاکدانه‌ها در مدت الک کردن می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد

یافت. چون تمامی روابط به طور یکسان بر اساس درصد ماده آلی، کربنات کلسیم و رس خاک آورده شده‌اند، مقایسه اثر این ویژگی‌ها بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها آسان است. می‌توان گفت که تأثیرگذاری ماده آلی بر مقاومت کششی خاکدانه‌های هوای-خشک حدود ۴۰ برابر رس و ۵۰ برابر کربنات کلسیم است. برای مکش ماتریک ۵۰۰ kPa، نسبت تأثیرگذاری ماده آلی به رس کاهش یافت. در مورد کربنات کلسیم، نسبت تأثیرگذاری ماده آلی به کربنات کلسیم بر Y خاکدانه‌ها بیش از ۲ برابر کاهش یافت. به نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت خاک، کربنات کلسیم که در حالت هوای-خشک به صورت غیرفعال در خاک وجود دارد، فعال‌تر شده و اثر خود را بیشتر از حالت هوای-خشک نشان می‌دهد. حل شدن این کانی و تولید یون‌همماوری‌کننده کلسیم، می‌تواند یکی از دلایل افزایش اهمیت آن با افزایش رطوبت خاکدانه‌ها باشد.

از سه ویژگی مهمی که نقش آنها در مقاومت کششی خاکدانه‌ها ارزیابی شد، مهم‌ترین ویژگی ماده آلی خاک بود که به طور جداگانه اثر آن بر Y خاکدانه‌ها بررسی شد. در شکل ۳ روابط برآش خطی Y خاکدانه‌ها در برابر مقدار ماده آلی خاک ترسیم شده است. مقدار ماده آلی خاک به ترتیب

اثرگذاری آن بر Y خاکدانه‌ها به مراتب بیشتر از دو ویژگی دیگر بود. هم‌چنین مشخص شد که افزایش رطوبت خاک باعث کاهش مقاومت کششی خاکدانه‌ها می‌شود، به‌گونه‌ای که مقاومت کششی خاکدانه‌ها در رطوبت هوا-خشک به‌طور میانگین 4 برابر مقاومت کششی آنها در مکش ماتریک 500 kPa بود.

به‌طور کلی ساختمان خاک‌های منطقه همدان نسبت به خاک‌های مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب دنیا، پایداری کمتری دارد. نقش ماده آلی در این خاک‌ها در ایجاد خاکدانه‌های پایدار نسبت به سایر ویژگی‌های خاک بیشتر قابل توجه است.

که در روش الک تر، زمان‌های کوتاه الک کردن (5 دقیقه) برای خاک‌های منطقه همدان مناسب است، زیرا بهترین (قوی‌ترین) رابطه بین MWD و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی در این زمان به‌دست آمد. از بین سه ویژگی (درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم) که اثر آنها بر MWD بررسی شد، مهم‌ترین ویژگی مقدار ماده آلی خاک بود.

ارتبط بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها (Y) در دو رطوبت هوا-خشک و 500 kPa با ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی نشان داد که بالاترین ضریب تبیین (R^2) برای Y خاکدانه‌ها با ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی برای مکش ماتریک 500 kPa به دست آمد. از سه ویژگی ذاتی مؤثر بر Y ، مهم‌ترین ویژگی، درصد ماده آلی خاک بود زیرا

منابع مورد استفاده

1. Amezketa, E. 1999. Soil aggregate stability: A review. *J. Sustain. Agric.* 14: 83-151.
2. Angers, D.A. and M. R. Carter. 1996. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils. In: Carter M.R. and B. A. Stewart (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Advances in Soil Science*. Lewis Pub., CRC Press Inc., Boca Raton, FL.
3. Beare, M.H. and R.R. Bruce. 1993. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: Implications for determining environmental effects on soil structure. *Geoderma* 56: 87-104.
4. Bullock, M.S., W.D. Kemper and S.D Nelson. 1988. Soil cohesion as affected by freezing, water content, time and tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 5: 770-776.
5. Causarano, H. 1993. Factors affecting the tensile strength of soil aggregates. *Soil Till. Res.* 28: 15-25.
6. Cole, R.H. 1939. Soil macrostructure as affected by cultural treatment. *Hilgardia* 12: 429-472.
7. Curtin, D., H. Steppuhn and F. Selles. 1994. Effects of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 730-737.
8. Dexter, A.R. 1988. Advances in the characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11: 199-238.
9. Dexter, A.R. and B. Kroesbergen. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agric. Eng. Res.* 31: 139-147.
10. Dickson, E.L., V. Rasiah and P.H. Groenevelt. 1991. Comparison of four prewetting techniques in wet aggregate stability determination. *Can. J. Soil Sci.* 71: 67-72.
11. Elliott, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 627-633.
12. Farrell, D.A., E.L. Greacen and W.E. Larson. 1967. The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 445-450.
13. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 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.
14. Guerif, J. 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Till. Res.* 16: 167-178.
15. Hall, A.J., J.H. Lemcoff and N. Trapani. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its component, and their determinants. *Maydica* 26: 19-38.
16. Heil, D. and G. Sposito. 1995. Organic matter role in illitic soil colloids flocculation. III. Scanning force microscopy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 266-264.
17. Jastrow, J.D. and R.M. Miller. 1991. Methods for assessing the effects of biota on soil structure. *Agric. Ecosys. Environ.* 34: 279-303.
18. Kemper, W.D. and R.C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. PP. 425-442. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed., Agron. Monog. 9. ASA and

SSSA, Madison, WI.

19. Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. PP. 635-662. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
20. Lynch, J.M. and E. Bragg. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* 2: 133-171.
21. Monnier, G. 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.* 16: 327-400.
22. Munkholm, L.J., P. Schjonning, K. Debosz, H.E. Jensen and B.T. Christensen. 2002a. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53: 129-137.
23. Munkholm, L.J., P. Schjonning and B.D. Kay. 2002b. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64: 125-135.
24. Nadler, A., G.J. Levey, R. Keren and H. Eisenberg. 1996. Sodic calcareous soil reclamation as affected by water chemical composition and flow rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 252-257.
25. Oades, J.M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biogeochem.* 5: 35-70.
26. Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. 1986. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed., Agron. Monog. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
27. Panabokke, C.R. and J.P. Quirk. 1957. Effect of initial water content on the stability of soil aggregates in water. *Soil Sci.* 83: 185-189.
28. Quirk, J.P. and R.S. Murray. 1991. Towards a model for soil structure behavior. *Aust. J. Soil Res.* 29: 828-867.
29. Rasiah, V. and B.D. Kay. 1994. Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 935-942.
30. Roberson, E.B., S. Sarig, C. Shennan and M.K. Firestone. 1995. Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1587-1594.
31. Shainberg, I., J.D. Rhoades and R.J. Prather. 1981. Effect of mineral weathering on clay dispersion and hydraulic conductivity of sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 273-277.
32. Ternan, J.L., A.G. Williams, A. Elmes and R. Hartley. 1996. Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management. *Earth Surface Processes and Landforms* 21: 181-193.
33. Watts, C.W. and A.R. Dexter. 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49: 73-84.
34. White, W.M. 1993. Dry aggregate distribution. PP.659-662. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Pub., Boca Raton, FL, USA.
35. Yadav, J.S.P. and I.K. Girdhar. 1981. The effect of different magnesium-calcium ratios and sodium adsorption values of leaching water on the properties of calcareous soils versus non-calcareous soils. *Soil Sci.* 131: 194-198.