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 محبوبی [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) الک‌کردن خاکدانه‌ها در آب به منظور اعمال تنش‌های مکانیکی- آبی در نظر گرفته شد. مقاومت کششی خاکدانه‌ها نیز در دو شرایط رطوبتی هوا-خشک 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 مناسب‌تر 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 ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی در مکش ماتریک ۵۰۰ kPa حاصل شد. نقش ماده آلی در این خاک‌ها در ایجاد خاکدانه‌های پایدار نسبت به 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 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 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

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

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

غذایی، دریافت، ذخیره و انتقال آب در خاک، مقاومت در برابر فرسایش، هدایت هیدرولیکی، تهویه، 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 مواجه 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 غلظت یون‌ها، رسانایی الکتریکی، نوع کاتیون غالب، SAR، ESP و 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 براگ (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 آب‌گریز (Hydrophobic coating) در اطراف خاکدانه‌ها باعث کاهش سرعت نفوذ آب به درون خاکدانه‌ها و افزایش مقاومت آنها در برابر تنش ناشی از خیس شدن سریع می‌شود.

ترنان و همکاران (۳۲) از رس به‌عنوان یک ملات بین ذرات خاک نام برده 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 به‌عنوان 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 بردند. 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. نادلر 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 نرم‌شدگی خاک (Soil crumbling)

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

و ارزیابی فرسایش‌پذیری بادی خاک به کار می‌رود (۱۸)؛ ولی روش الک تر 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)، منجر به خردشدن خاکدانه‌ها در نتیجه حبس ناگهانی هوا در منافذ آنها می‌شود. الیوت (۱۱) و رابرسون و همکاران (۳۰) به این نتیجه رسیدند که مرطوب کردن آهسته (Slow wetting) در مقایسه با مرطوب کردن سریع، باعث تخریب کمتر خاکدانه‌ها می‌شود. مرطوب کردن آهسته به دلیل اثر کمتر هوای محبوس و انبساط کندتر و همگن‌تر خاکدانه‌ها باعث تخریب کمتر ساختمان خاک می‌شود.

در کشور ما، مطالعه کمّی و گسترده چندانی در رابطه با روش‌های ارزیابی پایداری ساختمان خاک انجام نگرفته و اکثراً از روش‌های پیشنهاد شده برای خاک‌های پایدار مناطق مرطوب و نیمه مرطوب استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش ارائه 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 مقدارکربنات کلسیم بوده و غیرشور و غیرسدیمی باشند (جدول ۱). در پاییز ۱۳۸۴، نمونه خاک‌ها از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شده، به آزمایشگاه منتقل گردیده و هوا- خشک شدند. نمونه‌برداری به گونه‌ای انجام شد که کمترین تغییرشکل و تخریب 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 اشباع خاک‌ها به ترتیب به وسیله EC متر و pH متر اندازه‌گیری شدند (۲۶).

برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، از روش الک تر با 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 سرند شده (mm ۸-۰) 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 موئینه‌ای به رطوبت نظیر مکش ماتریک kPa ۲۰۰ رسانده شد (شکل ۱). دلیل افزایش رطوبت خاک‌ها به رطوبت نظیر مکش ماتریک kPa ۲۰۰، آن بود که خاک‌های کشاورزی در شرایط طبیعی تا شرایط هوا-خشک، خشک نمی‌شوند بلکه تا مکش‌هایی که احتمالاً حداکثر آن حدود kPa ۲۰۰ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]



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

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 ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر) ریخته شدند. سه زمان متفاوت ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه برای الک کردن خاکدانه‌ها در آب شهر در نظر گرفته شد. زمان تکان دادن الک‌ها در آب بیانگر مقدار انرژی وارده 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 ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس وزن شدند. در نهایت میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (Mean weight diameter, MWD) به کمک فرمول زیر محاسبه شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n} w_i \overline{X_i} \qquad [1]$$

که در این رابطه n تعداد دامنه اندازه خاکدانه (در اینجا ۶ عدد)، $\overline{X_i}$ 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) می‌باشند. هر خاک برای سه زمان تکان دادن و در سه تکرار آزمایش شد. جمعاً تعداد آزمایش‌های الک تر ۱۸۹ آزمایش (۲۱ خاک × ۳ زمان تکان دادن× ۳ تکرار) بود.

از روش غیرمستقیم برزیلی (Indirect Brazilian test) برای اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها (۹) در رطوبت هوا- خشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa استفاده شد. آزمایش‌های اولیه نشان داد که به دلیل پایداری اندک خاک‌های مورد بررسی، مقاومت کششی خاکدانه‌ها در مکش‌های ماتریک کمتر از ۵۰۰ kPa ناچیز بوده و تغییرشکل آنها عمدتاً خمیری و ماندگار می‌باشد که با اصول روش غیرمستقیم برزیلی مغایرت دارد. خاکدانه‌های با اندازه ۸-۶/۳ mm به روش الک خشک جدا شده و ۳۰ عدد از آنها به‌طور تصادفی برای هر آزمایش انتخاب و وزن شدند. برای تیمار مکش ماتریک ۵۰۰ kPa، ۳۰ عدد از خاکدانه‌های مذکور انتخاب شده و مکش ماتریک آنها با استفاده از پل آبی (شکل ۱) به ۵۰۰ 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:

$$Y = \frac{0/576F}{d_{eff}^2} \qquad [2]$$

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

$$d_{eff} = d_o \left(\frac{M_a}{M_o}\right)^{0/33} \qquad [3]$$

که در این رابطه d_o، قطر متوسط خاکدانه‌ها، M_o، میانگین جرم

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

۳۰ عدد خاکدانه و M_a، جرم خاکدانه مورد نظر می‌باشند (۹). برای هر خاک ۶۰ عدد خاکدانه با دو شرایط رطوبتی آزمایش شد. جمعاً تعداد ۱۲۶۰ آزمایش مقاومت کششی خاکدانه انجام شد (۲۱ خاک × ۲ رطوبت × 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 Y (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 Y) آنها و انحراف معیار و ضریب تغییرات هر کدام آورده شده است. خاک‌های مورد بررسی دامنه نسبتاً وسیعی از پایداری ساختمان (MWD و Y) دارند.

اثر تنش وارده 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: ۲/۶۰–۴/۱۰mm، ۲/۵۰-۳/۶۴ mm و۲/۳۵-۳/۵۵ mm بود. مقادیر MWD به‌دست آمده در این روش (مرطوب کردن آهسته) در مقایسه با مقادیر MWD ناشی از روش مرطوب کردن سریع (نتایج ارائه نشده است) بیشتر می‌باشد.

با افزایش زمان تکان دادن الک‌ها در آب (افزایش تنش‌های مکانیکی–آبی)، مقادیر MWD کاهش یافت (جدول ۱). مقدار میانگین MWD به ترتیب برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه، ۳/۳۵، ۳/۰۶ و۲/۹۰ mm به‌دست آمد. با توجه به مقادیر انحراف معیار به‌دست آمده برای زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه (به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۲۶ و ۰/۳۰ mm) می‌توان گفت که زمان ۵ 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. وایت (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 کوئیرک (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 ۴ تا ۶ نشان داده شده که تمامی آنها در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند:

$$MWD_5\,(mm) = ۲/۱۸ + ۰/۳۰۷\,OM\% + ۰/۰۱۱\,Clay\% + ۰/۰۱۵\,CaCO_3\% \qquad R^2 = ۰/۶۵ \qquad [۴]$$

$$MWD_{10}\,(mm) = ۲/۳۰ + ۰/۲۲۴ OM\% + ۰/۰۰۸\,Clay\% + ۰/۰۰۷\,CaCO_3\% \qquad R^2 = ۰/۶۴ \qquad [۵]$$

$$MWD_{15}\,(mm) = ۱/۹۹ + ۰/۲۳۳\,OM\% + ۰/۰۱۰\,Clay\% + ۰/۰۰۹\,CaCO_3\% \qquad R^2 = ۰/۶۴ \qquad [۶]$$

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 $CaCO_3$% به ترتیب بیانگر درصدهای ماده آلی، رس و کربنات کلسیم خاک می‌باشند. با توجه به معادله‌های به‌دست آمده بالاترین ضریب تبیین (R^2) برای زمان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]
[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

جدول ۱. برخی از ویژگی‌ها و پایداری خاکدانه‌های خاک‌های مورد بررسی [۱]

شماره خاک	محل نمونه‌برداری	رده‌بندی	طول و عرض جغرافیایی	رس	ماده آلی	کربنات کلسیم	pH	EC	MWD_5	MWD_{10}	MWD_{15}	$Y_{air-dry}$	$Y_{500\ kPa}$
				----------%w/w----------				$dS\ m^{-1}$	----------mm----------			---------kPa---------	
۱	خمیس‌آباد	Typic Halaquepts	۴۸° ۰۲′ ۰۷″ E , ۳۴° ۲۹′ ۰۹″ N	۲۶/۰	۰/۵۶	۲۱/۵	۷/۳	۰/۵۵	۲/۶۰	۲/۵۰	۲/۳۵	۸۶	۲۷
۲	آقاجانبلاغی	Vertic Xerochrepts	۴۸° ۰۲′۱۵″ E , ۳۴° ۵۱′ ۱۰″ N	۲۵/۰	۱/۳۰	۱۷/۵	۷/۵	۰/۷۵	۳/۱۰	۲/۸۲	۲/۶۷	۸۲	۲۶
۳	سیاه‌گله ۱	Typic Endoaquepts	۴۷° ۵۹′۰۹″ E , ۳۴° ۵۷′ ۱۲″ N	۲۷/۰	۰/۹۴	۱۲/۰	۸/۱	۰/۶۴	۲/۸۲	۲/۷۳	۲/۵۶	۱۱۸	۲۷
۴	قاسم‌آباد	Typic Haploxeralfs	۴۸° ۵۸′۰۱″ E , ۳۴° ۴۱′ ۱۱″ N	۲۱/۰	۱/۱۰	۲۱/۵	۷/۲	۰/۸۸	۳/۴۵	۳/۱۵	۳/۰۲	۸۸	۲۷
۵	جعفرآباد	Typic Calcixerepts	۴۷° ۵۵′۱۷″ E , ۳۴° ۴۴′ ۱۳″ N	۲۰/۰	۱/۲۴	۳۱/۵	۷/۶	۰/۷۷	۳/۱۰	۲/۹۴	۲/۶۳	۱۲۲	۲۶
۶	نجف‌آباد ۱	Typic Haploxeralfs	۴۷° ۵۹′۰۷″ E , ۳۴° ۳۹′ ۰۹″ N	۲۸/۰	۰/۶۴	۲۵/۵	۷/۰	۰/۶۹	۲/۹۰	۲/۶۵	۲/۵۴	۸۶	۲۸
۷	موسی‌آباد ۱	Aeric Haplaquepts	۴۷° ۵۹′۰۱″ E , ۳۴° ۴۳′ ۰۵″ N	۱۸/۰	۱/۸۷	۱۸/۰	۷/۱	۰/۷۱	۳/۱۰	۲/۹۴	۲/۵۶	۱۰۵	۳۰
۸	وندرآباد	Aeric Halaquents	۴۸° ۰۴′۱۰″ E , ۳۴° ۴۱′ ۱۲″ N	۲۷/۰	۱/۰۰	۱۴/۰	۷/۸	۰/۵۴	۳/۴۰	۳/۱۰	۲/۸۲	۹۳	۲۷
۹	گره‌چقا	–	۴۸° ۰۵′۱۸″ E , ۳۴° ۲۱′ ۲۱″ N	۲۱/۰	۲/۰۶	۲۲/۰	۷/۵	۰/۷۸	۳/۴۵	۳/۲۵	۳/۱۵	۱۳۷	۲۹
۱۰	صالح‌آباد	–	۴۸° ۲۱′۰۸″ E , ۳۴° ۵۵′ ۱۷″ N	۱۵/۰	۱/۲۳	۳۰/۵	۷/۶	۰/۶۸	۳/۲۰	۳/۰۰	۲/۸۴	۱۶۵	۳۴
۱۱	موسی‌آباد ۲	Aeric Haplaquepts	۴۷° ۵۹′۱۶″ E , ۳۴° ۴۳′ ۱۵″ N	۲۱/۰	۱/۵۷	۱۰/۵	۸/۱	۰/۴۶	۳/۱۰	۳/۱۰	۳/۰۰	۱۲۸	۳۱
۱۲	نجف‌آباد ۲	Typic Calcixerepts	۴۷° ۵۹′۱۶″ E , ۳۴° ۳۹′ ۱۴″ N	۲۸/۰	۲/۲۱	۲۰/۵	۷/۸	۰/۷۹	۳/۲۰	۳/۱۰	۲/۷۲	۱۳۴	۳۱

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0] [Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

ادامه جدول۱.

۱۳	نصرت‌آباد ۱	Fluvaqentic Haploxerolls	۴۸° ۵۷′۱۲″ E , ۳۴° ۴۰′ ۱۶″ N	۳۱/۰	۱/۸۷	۲۰/۵	۷/۷	۰/۴۹	۳/۸۴	۳/۱۴	۲/۷۶	۱۲۲	۳۰
۱۴	پل‌شکسته	Typic Calcixerepts	۴۸° ۰۳′۱۱″ E , ۳۴° ۳۹′ ۰۹″ N	۲۸/۰	۲/۱۰	۲۲/۰	۷/۵	۰/۷۹	۳/۲۰	۲/۹۴	۲/۸۵	۱۳۷	۳۰
۱۵	نصرت‌آباد ۲	Fluvaqentic Haploxerolls	۴۸° ۵۷′۲۳″ E , ۳۴° ۴۰′ ۲۵″ N	۲۵/۰	۲/۲۴	۲۲/۵	۷/۴	۰/۸۳	۳/۳۴	۳/۰۲	۲/۸۹	۱۱۱	۲۹
۱۶	آهوتپه ۱	–	۴۸° ۰۰′۱۰″ E , ۳۴° ۵۷′ ۱۳″ N	۲۵/۰	۲/۵۰	۲۴/۰	۷/۳	۰/۶۶	۳/۶۴	۳/۱۵	۳/۰۹	۱۶۵	۳۴
۱۷	موسی‌آباد ۳	Aeric Haplaquepts	۴۸° ۰۰′۱۳″ E , ۳۴° ۴۲′ ۰۹″ N	۳۲/۰	۲/۴۰	۳۰/۵	۷/۹	۰/۶۹	۳/۶۰	۳/۲۰	۳/۲۰	۱۷۵	۳۸
۱۸	کهریز ۱	Typic Calcixerepts	۴۸° ۱۰′۱۴″ E , ۳۴° ۲۰′ ۱۵″ N	۳۳/۰	۱/۷۰	۶۰/۰	۸/۴	۰/۵۴	۴/۰۰	۳/۴۵	۳/۳۶	۱۶۰	۳۲
۱۹	سیاه‌گله ۲	Typic Endaoquepts	۴۷° ۵۹′۲۱″ E , ۳۴° ۵۷′ ۲۳″ N	۳۱/۰	۱/۹۷	۲۷/۵	۸/۱	۰/۵۹	۳/۷۹	۳/۲۵	۳/۱۲	۱۱۵	۳۲
۲۰	کهریز ۲	Typic Xerofluvents	۴۸° ۱۰′۰۳″ E , ۳۴° ۲۰′ ۰۶″ N	۵۷/۰	۲/۱۰	۱۸/۵	۷/۲	۰/۵۳	۳/۴۵	۳/۲۵	۳/۲۰	۱۷۵	۳۱
۲۱	آهوتپه ۲	–	۴۸° ۰۰′۲۴″ E , ۳۴° ۵۷′ ۲۱″ N	۶۸/۰	۲/۲۰	۲۴/۵	۶/۹	۰/۶۴	۴/۱۰	۳/۶۴	۳/۵۵	۱۴۹	۳۱
میانگین	–	–	–	۲۹/۰	۱/۶۶	۲۳/۵	۷/۶	۰/۶۷	۳/۳۵	۳/۰۶	۲/۹۰	۱۲۶	۳۰
انحراف معیار	–	–	–	۱۲/۲	۰/۵۹	۱۰/۱	۰/۴	۰/۱۲	۰/۳۸	۰/۲۶	۰/۳۰	۳۰	۳
%CV	–	–	–	۴۲/۰	۳۵/۵	۴۳/۰	۵/۳	۱۷/۸	۱۱/۵	۸/۵	۱۰/۵	۲۴/۰	۱۰/۱

۱. MWD_5، MWD_{10} و MWD_{15} به ترتیب نشان دهنده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (متوسط سه تکرار) در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه تکان دادن الک‌ها در روش الک تر می‌باشند. $Y_{air\text{-}dry}$ و $Y_{500\ kPa}$ به ترتیب بیانگر مقاومت کششی خاکدانه‌ها در شرایط رطوبتی هوا–خشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa است. CV% بیانگر درصد ضریب تغییرات می‌باشد.

۵ دقیقه به‌دست آمده است. در واقع بیشترین هم‌بستگی بین MWD و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مورد بررسی (درصد ماده آلی، رس و کربنات کلسیم) در زمان‌های کوتاه الک کردن (۵ دقیقه) به‌دست آمد. هم‌چنین با توجه به معادله‌های ۴ تا ۶ مشخص می‌شود که بیشترین نقش در پایداری خاکدانه‌ها و مقدار MWD خاک‌های مورد بررسی را ماده آلی ایفا می‌کند. مثلاً برای زمان ۵ دقیقه، می‌توان گفت که تأثیرگذاری ماده آلی بر مقدار MWD حدود ۲۸ برابر رس و ۲۰ برابر کربنات کلسیم است. با افزایش زمان الک‌کردن، مقدار ضریب (نقش) ماده آلی در پایداری خاکدانه‌ها از ۰/۳۰۷ به ۰/۲۳۳کاهش 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 مجموعه‌های معدنی- آلی (Organo-mineral complexes) می‌دهند که به تجزیه مقاوم‌اند.

ماده آلی از بین سه ویژگی، مهم‌ترین نقش را در پایداری ساختمان خاک داشت که به‌طور 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 ۱ درصد معنی‌دار می‌باشند. مقدار ماده آلی خاک به تنهایی توانسته است حدود ۴۰ درصد تغییرات MWD را توجیه کند. با افزایش انرژی وارده 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 کوتاه الک‌کردن (تنش‌های کم)، بیشتر قابل توجه است.

اثر شرایط رطوبتی بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها

مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها (Y) در شرایط رطوبتی هوا- خشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa برای خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. دامنه تغییرات Y در خاک‌های مورد بررسی برای شرایط رطوبتی هوا-خشک و مکش ماتریک ۵۰۰ kPa به ترتیب ۱۷۵-۸۲ kPa و ۳۸-۲۶ kPa بود.

در مکش‌های ماتریک پائین‌تر از ۵۰۰ 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 ۱۰۰ kPa استفاده کرد. مانکهلم و همکاران (۲۳) مقاومت کششی خاکدانه‌های خاک‌های دانمارک را در مکش‌های ماتریک ۳۰ و ۱۰kPa اندازه‌گیری کردند.

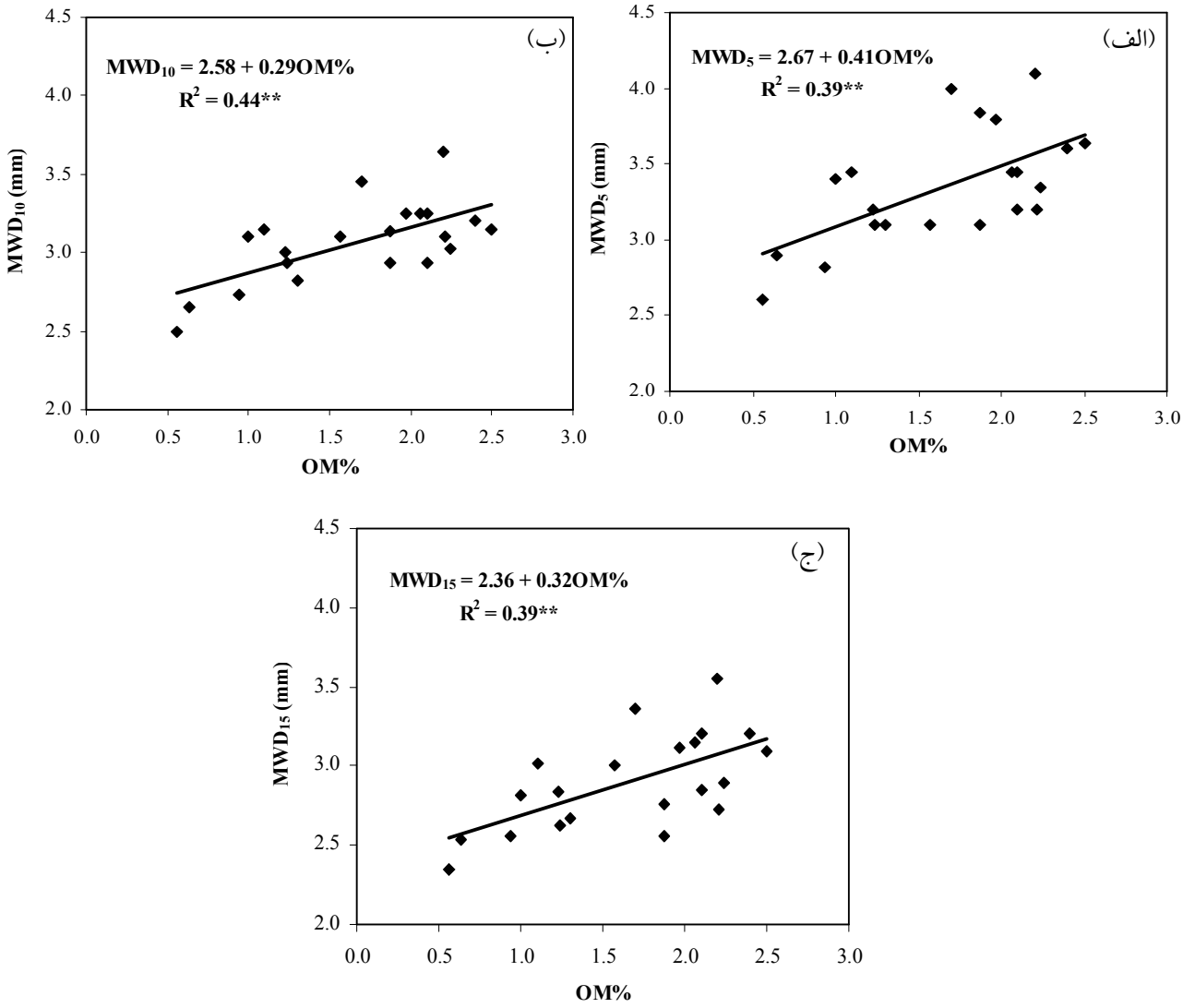
با کاهش مکش ماتریک خاک، Y خاکدانه‌ها کاهش یافت (جدول ۱). مقدار میانگین Y در رطوبت هوا-خشک بیش از ۴ برابر مقدار میانگین Y آنها در مکش ماتریک ۵۰۰ kPa بود. فارل و همکاران (۱۲) دریافتند که با افزایش مقدار رطوبت خاک، مقاومت کششی خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. در واقع افزایش رطوبت خاک باعث ضعیف شدن پیوند بین ذرات خاکدانه‌ها شده و مقاومت کششی آنها را کاهش می‌دهد. گوئریف (۱۴) و کاسارانو (۵) نیز گزارش کردند که با افزایش رطوبت خاک، مقدار مقاومت کششی آن به‌طور خطی کاهش می‌یابد. کاسارانو (۵) یک رابطه خطی منفی با ضریب تبیین بالا (R^2=۰/۹۵) بین مقاومت کششی و مقدار رطوبت خاک به‌دست آورد. مانکهلم و همکاران (۲۲) خاکدانه‌ها را به چهار وضعیت رطوبتی هوا- خشک و مکش‌های ماتریک ۱۰۰، ۳۰ و ۱۰ kPa رسانده و نشان دادند که بیشترین مقاومت کششی را خاکدانه‌های هوا- خشک و پس از آن به ترتیب، خاکدانه‌های با مکش‌های ماتریک ۱۰۰، ۳۰ و ۱۰ 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]



شکل۲. 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.

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

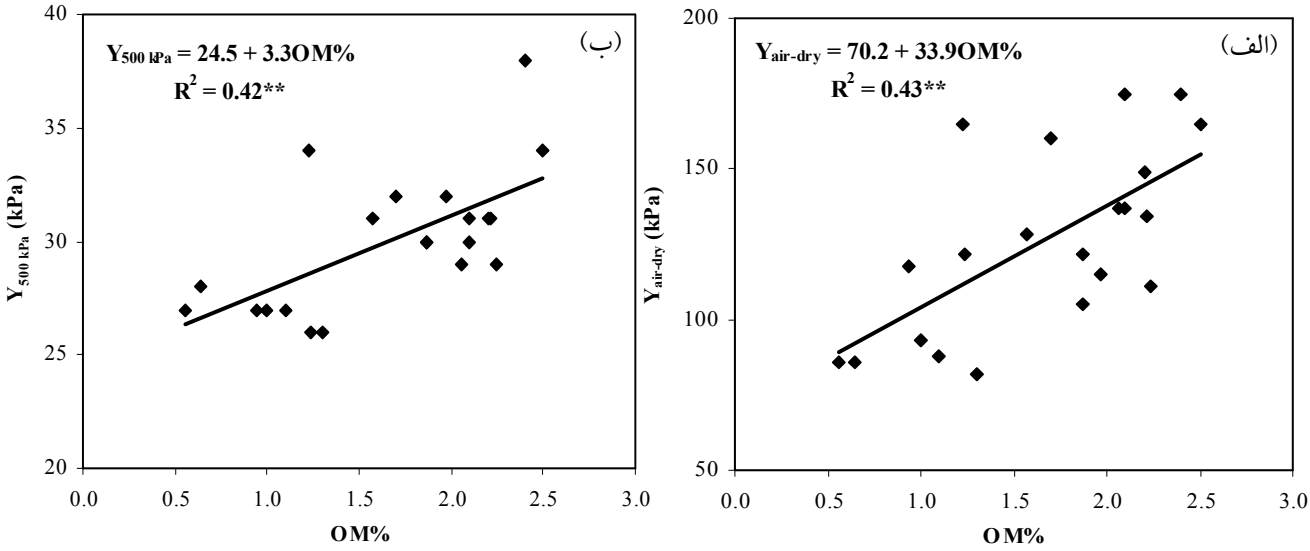
$$Y_{air\text{-}dry}\,(kPa) = ۳۸/۲+۳۲/۲\ OM\% + ۰/۸۳+ Clay\%\ ۰/۴۶\ CaCO_۳\% \qquad R^۲ = ۰/۷۱ \qquad [۷]$$

$$Y_{500\ kPa}\,(kPa) = ۲۰/۱+۲/۷\ OM\% + ۰/۱۳ Clay\% + ۰/۰۸\ CaCO_۳\% \qquad R^۲ = ۰/۸۴ \qquad [۸]$$

در این روابط $Y_{air\text{-}dry}$ و $Y_{500\ kPa}$ به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت کششی خاکدانه‌ها در حالت هوا- خشک و مکش ماتریک kPa ۵۰۰ است. مشاهده می‌شود که بالاترین ضریب تبیین ($R^۲$) به مکش ماتریک 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]



شکل۳. رابطه بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها (Y) و درصد ماده آلی خاک (OM%) در شرایط رطوبتی: الف) هوا- خشک و ب) ۵۰۰ kPa

یافت. چون تمامی روابط به‌طور یکسان بر اساس درصدهای 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 هوا- خشک حدود ۴۰ برابر رس و ۷۰ 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. به‌نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت خاک، کربنات کلسیم که در حالت هوا- خشک به صورت غیرفعال در خاک وجود دارد، فعال‌تر شده و اثر خود را بیشتر از حالت هوا- خشک نشان می‌دهد. حل شدن این کانی و تولید یون هماوری‌کننده 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 به‌طور جداگانه اثر آن بر Y خاکدانه‌ها بررسی شد. در شکل۳ روابط برازش خطی Y خاکدانه‌ها در برابر مقدار ماده آلی خاک ترسیم شده است. مقدار ماده آلی خاک به ترتیب توانسته است ۴۳ و ۴۲ درصد تغییرات $Y_{air-dry}$ و $Y_{500\ kPa}$ را توجیه کند. میزان اثر ماده آلی (شیب رابطه برازش) 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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

که در روش الک تر، زمان‌های کوتاه الک کردن (۵ 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.

ارتباط بین مقاومت کششی خاکدانه‌ها (Y) در دو رطوبت هوا- خشک و ۵۰۰ 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 ۵۰۰ kPa به دست آمد. از سه ویژگی ذاتی مؤثر بر Y، مهم‌ترین ویژگی، درصد ماده آلی خاک بود زیرا 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 ۴ برابر مقاومت کششی آنها در مکش ماتریک ۵۰۰ 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.

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

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]

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 matieres organiques sur la stabilite 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-15]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1387.12.44.10.0]