اندازه‌گیری مقاومت مکانیکی و بررسی پدیده سخت‌شوندگی در برخی از خاک‌های استان همدان

الهام فراهانی[۱]، محمد رضا مصدقی[۲*] و علی اکبر محبوبی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۵)

چکیده

پدیده سخت‌شوندگی یکی از نشانه‌های کیفیت فیزیکی ضعیف خاک است. خاک‌های سخت‌شونده، خاک‌هایی هستند که تغییر مقاومت مکانیکی آنها با خشک‌شدن شدید بوده، در هنگام خشک‌شدن، سخت و متراکم شده و خاک‌ورزی آنها دشوار است. خاک‌های سخت‌شونده دارای دشواری‌هایی مانند تهویه ضعیف در شرایط مرطوب، مقاومت مکانیکی زیاد در دامنه رطوبتی خشک، نفوذپذیری اندک و رواناب و فرسایش زیاد می‌باشند. با توجه به این‌که اکثر خاک‌های ایران از نظر ماده آلی فقیرند، انتظار می‌رود که پدیدهٔ سخت‌شوندگی در برخی از آنها رخ دهد. این پژوهش بر روی ۹ سری خاک از استان همدان با هدف بررسی پدیده سخت‌شوندگی از راه اندازه‌گیری سه نوع مقاومت کششی (ITS)، فشاری غیرمحصور (UCS) و فروروی (PR) در نمونه‌های بازساخته‌شدهٔ خاک انجام شد. آزمون‌های ITS، UCS و PR بر روی نمونه‌های ساخته‌شده با چگالی ظاهری (BD) که ضریبی از BD بحرانی برای رشد گیاه ($۰/۹BD_{critical}$) بود، انجام شدند. هم‌چنین ویژگی‌های ذاتی مؤثر بر این پدیده بررسی شد. براساس تعریف پیشنهادی در سمپوزیوم جهانی خاک‌های سخت‌شونده و سله‌دار به اتحادیه بین‌المللی خاک‌شناسی، که مقاومت کششی خاک سخت‌شونده در حالت هوا-خشک باید بزرگ‌تر یا برابر ۹۰ kPa باشد، می‌توان گفت که در $۰/۹BD_{critical}$، تنها یکی از خاک‌های مورد بررسی (با بافت متوسط) سخت‌شونده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌های با بافت متوسط بیش‌تر مستعد سخت‌شوندگی هستند. در تمامی خاک‌های مورد بررسی، با افزایش درصد رس، مقدار ITS افزایش یافت. هم‌چنین اثر افزایشی مقدار رس بر UCS و اثر افزایشی مقدار کربنات کلسیم بر PR دیده شد. کربنات کلسیم مانند سیمانی بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث گردیده خاک بیش‌تر مستعد سخت‌شوندگی شود. هم‌چنین در تمامی خاک‌های مورد بررسی، روند کاهشی مقادیر مقاومت مکانیکی با افزایش مقدار رطوبت خاک مشاهده گردید. شیب مدل نمایی (b) برازش‌یافته بر منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی به‌عنوان شاخص سخت‌شوندگی خاک، رابطه‌ای مثبت با مقدار شن و رابطه‌ای منفی با مقدار سیلت برقرار کرد. درکل می‌توان گفت بافت و مقدار کربنات کلسیم از عوامل مهم و مؤثر بر پدیدهٔ سخت‌شوندگی در خاک‌های همدان می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: کیفیت فیزیکی خاک، پدیده سخت‌شوندگی، مقاومت مکانیکی خاک، چگالی ظاهری بحرانی، مدل نمایی

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

مقدمه

برخی از نشانه‌های کیفیت فیزیکی ضعیف خاک، عبارتند از نفوذ اندک آب در خاک، ایجاد روان‌آب، تهویه ضعیف، محدودیت رشد ریشه گیاهان در خاک، کارایی ضعیف خاک و پدیده سخت‌شوندگی (Hardsetting phenomenon) (۴). تعریفی که توسط کمیته پژوهشی سمپوزیوم جهانی خاک‌های سخت‌شونده و سله‌دار در بریس‌بان استرالیا (۱۹۹۴) برای یک افق سخت‌شونده، به اتحادیه بین‌المللی خاک‌شناسی (IUSS) پیشنهاد شد عبارت است از: یک افق سخت‌شونده در هنگام خشک‌شدن به توده متراکم همگنی تبدیل‌شده، در حالت هوا- خشک سخت و شکننده بوده و امکان فروبردن انگشت سبابه در آن وجود ندارد. هم‌چنین مقاومت کششی آن در حالت هوا- خشک بزرگ‌تر یا برابر ۹۰ kPa می‌باشد. چنین خاک‌هایی دائماً سیمانی نبوده و در هنگام مرطوب‌شدن نرم شده ولی در هنگام خشک‌شدن دوباره به حالت سخت برمی‌گردند (۱۹). سخت‌شوندگی شامل فروریختگی ساختمانی در هنگام و پس از مرطوب‌شدن و سخت‌شدن بدون ساختمان‌سازی دوباره در هنگام خشک‌شدن می‌باشد (۲۰). تنها خاک‌هایی که به اندازه کافی از نظر ساختمانی ناپایدار هستند، شبیه خاک‌های سخت‌شونده می‌باشند (۱۹). سله‌بندی مانند سخت‌شوندگی رخ می‌دهد، اما بسیاری از خاک‌هایی که سله می‌بندند، سخت‌شونده نیستند (۲۳).

افزایش شدیدی در مقاومت مکانیکی خاک‌های سخت‌شونده در هنگام خشک‌شدن رخ می‌دهد. کشاورزان واژه خاک‌های هنگام- نهار (Lunch-time soils) را برای آنها به کار می‌برند که چنین خاک‌هایی هنگام صبح برای خاک‌ورزی خیلی مرطوب بوده و در هنگام عصر هم برای خاک‌ورزی خیلی خشک‌اند، اما هنگام ظهر شرایط برای خاک‌ورزی بهینه است. اگر چه این تعریف اغراق‌آمیز است، ولی به خوبی بیان‌گر باریک بودن دامنه رطوبتی مناسب آنها برای خاک‌ورزی می‌باشد (۲۰). تمام خاک‌هایی که در رده‌بندی FAO (۸) به عنوان لووی‌سول، پلانوسول یا سولونتز و در روش رده‌بندی آمریکایی به عنوان آلفی‌سول رده‌بندی شده‌اند، ممکن است خاک‌های سخت‌شونده باشند. دامنه بافتی شن لومی تا رس شنی در محدوده خاک‌های مستعد سخت‌شوندگی قرار می‌گیرند. ویژگی مقاومت مکانیکی کم در هنگام خشک‌شدن، سبب می‌شود که خاک‌های شنی سخت‌شونده به شمار نیایند. اکثر خاک‌های رسی نیز سخت‌شونده نمی‌باشند، زیرا در هنگام خشک‌شدن به دلیل تشکیل درز و ترک دوباره ساختمان‌دار می‌شوند. خاک‌هایی که مقدار ماده آلی زیادی دارند، سخت نمی‌شوند، ولی خاک‌هایی که مقدار ماده آلی آنها کمتر از ۲ درصد باشد، در برابر تنش‌های ناشی از مرطوب‌شدن سریع، ناپایدارند. لی و همکاران (۱۲) و یانگ و همکاران (۲۷) دریافتند که مقادیر بزرگ مقاومت کششی در افق سخت‌شونده نسبت به یک افق غیرسخت‌شونده، به دلیل نبود ترک‌های ریز بوده و این تأثیر چشم‌گیر قفل‌شدگی ذرات بر مقاومت کششی خاک را بیان می‌کند.

بررسی پدیده سخت‌شوندگی در برخی از خاک‌های استان اصفهان توسط مصدقی و همکاران (۱۴ و ۱۷) انجام گرفته و دیده شد که ذرات ریز کربنات کلسیم در خاک می‌توانند مانند ذرات رس در ایجاد مقاومت مکانیکی نقش ایفا کنند. مصدقی و همکاران (۱۶) مقاومت کششی (ITS) مخلوط‌های شن با کربنات کلسیم و رس پالی‌گورسکیت را بررسی کرده و گزارش کردند که با افزایش مکش ماتریک، ذرات ریز کربنات کلسیم و پالی‌گورسکیت به نقاط تماس بین ذرات درشت‌تر شن کشیده شده، به‌وسیله نیروهای موئینه بین ذرات درشت پیوند برقرار شده و تنش مؤثر و مقاومت مکانیکی مخلوط‌ها افزایش یافت. کانی پالی‌گورسکیت (با واحدهای فیبری پیونددهنده ذرات درشت‌تر شن) در مقایسه با کربنات کلسیم در افزایش ITS اثر بیش‌تری دارد. با توجه به این‌که اکثر خاک‌های ایران از نظر ماده آلی فقیرند، انتظار می‌رود برخی از آنها دارای پدیده سخت‌شوندگی باشند. شناخت این پدیده و عوامل مهم مؤثر بر آن، به مدیریت و بهبود این خاک‌ها کمک می‌کند. هدف از این پژوهش بررسی پدیده سخت‌شوندگی با اندازه‌گیری سه نوع

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

مقاومت مکانیکی روی نمونه‌های بازساخته‌شده برخی از خاک‌های استان همدان بود.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد بررسی

این پژوهش روی ۹ سری خاک از مناطق مختلف استان همدان انجام شد. استان همدان دارای اقلیم نیمه‌خشک و میانگین بارندگی سالیانه ۳۱۱ میلی‌متر می‌باشد. اغلب بارندگی در فصل زمستان اتفاق می‌افتد. میانگین دمای بیشینه ماهانه استان ۲۵/۵ درجه سانتی‌گراد در تیر ماه و کمینه آن ۵/۵- درجه سانتی‌گراد در دی ماه گزارش شده است. سعی شد از خاک‌های زراعی با ویژگی‌های ذاتی گسترده نمونه‌برداری انجام شود. نمونه‌برداری دست‌خورده و مرکب از لایه ۳۰-۰ cm خاک در زمان آیش انجام شد. برای نمونه‌برداری از بیلچه نمونه‌برداری که کمترین آسیب را به خاکدانه‌ها وارد می‌کند، استفاده شد. پس از نمونه‌برداری، خاک‌ها برای سایر آزمایش‌ها هوا-خشک شدند. برای آزمایش‌های مقاومت‌های کششی، فشاری غیرمحصور و فروروی، بخشی از خاک هوا-خشک با کمترین آسیب به خاکدانه‌ها از الک ۴ میلی‌متر عبور داده شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، مقداری از نمونه‌ها پس از کوبیده‌شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند.

محاسبه چگالی ظاهری بحرانی، آماده‌سازی نمونه‌های خاک و اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک

در ایران پژوهشی در مورد چگالی ظاهری بحرانی ($BD_{critical}$) خاک‌ها برای رشد ریشه گیاهان انجام نگرفته و رابطه‌ای ارائه نشده است. از این رو در این پژوهش برای تعیین $BD_{critical}$ از رابطه ارائه‌شده توسط جونز (۱۰) و دکستر (۵) استفاده شد:

$$BD_{critical} = 1.882 - 0.0083\%Clay \qquad [۱]$$

که در آن براساس درصد رس خاک (%Clay)، $BD_{critical}$ برحسب مگاگرم بر مترمکعب ($Mg\ m^{-3}$) محاسبه می‌گردد. مقدار $BD_{critical}$ محاسبه‌شده با معادله ۱، بیان‌گر حد پایینی چگالی ظاهری بحرانی برای رشد ریشه گیاهان است. برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک (Soil water characteristic curve, SWCC) از نمونه‌های خاک بازساخته‌شده استفاده شد. برای تهیه نمونه بازساخته‌شده، چگالی ظاهری (BD) و حجم نمونه (V_t) مشخص بوده و از رابطه زیر مقدار جرم خاک خشک (M_s) محاسبه شد:

$$M_s = BD \times V_t \qquad [۲]$$

به‌منظور یکنواختی شرایط اولیه تهیه نمونه‌های بازساخته‌شده برای تمامی خاک‌ها، مکش ماتریک ۸۰۰ hPa انتخاب شد که رطوبت در این مکش ماتریک، رطوبت بینابینی است؛ یعنی نه خیلی خشک است که متراکم‌کردن خاک به آسانی انجام نشود و نه خیلی مرطوب است که خاکدانه‌ها در هنگام تراکم تخریب شوند (۱۸). مصدقی و همکاران (۱۸) دریافتند که مکش ماتریک مناسب برای خاک‌ورزی در برخی از خاک‌های استان همدان در دامنه ۶۱۲ hPa -۵۵۱ قرار دارد. در پژوهش حاضر از مکش ماتریک برابر ۸۰۰ hPa برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد که اندکی بیش‌تر از مکش ماتریک مناسب برای خاک‌ورزی بود تا امکان آسیب به ساختمان و خاکدانه‌ها کمینه شود. مقدار آب مورد نیاز (M_{H2O}) برای رساندن رطوبت خاک هوا-خشک به رطوبت در مکش ماتریک ۸۰۰ hPa با فرمول زیر محاسبه شد:

$$M_{H_2O} = M_s\left(w_{800hPa} - w_{air-dry}\right) \qquad [۳]$$

که در آن w_{800hPa} مقدار رطوبت جرمی خاک در مکش ماتریک ۸۰۰ hPa می‌باشد.

پس از افزودن آب، نمونه‌های خاک در ظروف دربسته برای ۲۴ ساعت نگه‌داری شدند تا رطوبت خاک به تعادل برسد. پس از گذشت این مدت زمان، خاک‌های مرطوب برای ساختن نمونه‌های خاک استوانه‌ای در سیلندرهای فلزی با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر با چگالی ظاهری ۰/۹$BD_{critical}$ متراکم شدند. مصدقی و همکاران (۱۸) نشان دادند که هم‌بستگی قویی بین مقادیر ۰/۹$BD_{critical}$ و چگالی ظاهری خاک طبیعی (در مکان واقعی) وجود دارد. بنابراین نمونه‌های

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

خاک با چگالی ظاهری $0/9BD_{critical}$ به خوبی شرایط طبیعی خاک مزرعه را شبیه‌سازی می‌کنند. برای اندازه‌گیری SWCC، ابتدا استوانه‌های خاک به آهستگی به مدت ۲۴ ساعت از قسمت زیر اشباع شدند. سپس با استفاده از دستگاه جعبه شن (Sand box) مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۷۰hPa اندازه‌گیری شد. مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک بیش‌تر یعنی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ hPa با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (Pressure plate) اندازه‌گیری شد. پس از کاربرد آخرین مکش ماتریک، مقادیر رطوبت وزنی و حجمی خاک در مکش‌های ماتریک مختلف با خشک‌کردن خاک در آون در دمای ۱۰۵°C و به مدت ۲۴ ساعت محاسبه شد.

تهیه نمونه‌های بازساخته‌شده برای آزمون‌های مقاومت مکانیکی

نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳ سانتی‌متر، و با قطر ۳/۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۸ سانتی‌متر در ۱۵ رطوبت مختلف از نزدیک اشباع تا آون-خشک و در چگالی ظاهری برابر $0/9BD_{critical}$، برای هر خاک به‌ترتیب برای انجام آزمون‌های مقاومت کششی و مقاومت فشاری غیرمحصور ساخته شدند. هم‌چنین نمونه‌هایی با همان ابعاد نمونه‌های مقاومت کششی و در همان دامنهٔ رطوبتی و چگالی ظاهری، اما محصور در درون سیلندرهای فلزی، به منظور انجام آزمون مقاومت فروروی ساخته شدند.

آزمون مقاومت‌های مکانیکی خاک‌ها

آزمون مقاومت کششی (ITS)

مقاومت کششی با استفاده از روش غیرمستقیم (برزیلی) اندازه‌گیری شد. در این روش، بارگذاری روی نمونه‌های استوانه‌ای در جهت قطری انجام می‌شود، تا هنگامی‌که گسیختگی کششی در نمونه رخ داده و اولین ترک مشاهده گردد. اندازه‌گیری نیرو در آزمون ITS با استفاده از رینگ نیرو با دقت ۰/۵۶۳ نیوتن انجام شد. تغییرشکل قطری ایجادشده (عرض صاف‌شدگی و فاصله بین دو بخش صاف‌شده) در هنگام گسیختگی، یادداشت شده و برای محاسبه ITS مورد استفاده قرار گرفت. از معادله فریدمن (۹) برای محاسبه مقاومت کششی استفاده شد که به‌صورت زیر است:

$$\mathrm{ITS} = \frac{2F_{max}}{\pi dl} \times g(x) \qquad [۴]$$

که در آن F_{max} نیروی فشاری در هنگام گسیختگی، d و l به‌ترتیب قطر و ارتفاع نمونه و $g(x)$ ضریب صاف‌شدگی می‌باشند. $g(x)$ از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$g(x) = \left(\frac{-d}{2a}\right)\left\{2x - \sin 2x - \frac{2y}{d}\ln\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{x}{2}\right)\right\} \qquad [۵]$$

که در آن a عرض بخش صاف‌شده استوانه خاک در تماس با صفحه بارگذاری در هنگام گسیختگی، y فاصله بین دو بخش صاف‌شده در نقطه گسیختگی و $x=a/y$ نسبت صاف‌شدگی می‌باشند. متغیر x در توابع مثلثاتی sin و tan برحسب رادیان می‌باشد. این رابطه در شرایط $x<0/27$ که منجر به مقادیر $g(x)>0/9$ می‌شود، صادق است (۷).

آزمون مقاومت فشاری غیرمحصور (UCS)

روش تک‌محوری برای آزمون مقاومت فشاری غیرمحصور استفاده شد، یعنی تنها تنش محوری به نمونه‌های استوانه‌ای وارد شده و تنش‌های جانبی برابر صفر بودند. در این روش، بارگذاری در امتداد طولی نمونه‌های استوانه‌ای انجام می‌شود، تا هنگامی‌که گسیختگی برشی رخ دهد (۱، ۲ و ۳). پایان آزمون در نمونه‌های خشک و مرطوب متفاوت بود. در نمونه‌های خاک با رطوبت کم و درشت‌بافت، گسیختگی ترد (Brittle failure) رخ داد که هنگام افت نیرو و ایجاد سطح گسیختگی، پایان بارگذاری است. در نمونه‌های خاک مرطوب گسیختگی بشکه‌ای یا نرم (Ductile failure) رخ داده و در نمونه سطوح گسیختگی مشخصی ایجاد نمی‌شود. به همین دلیل پایان آزمون به‌طور قراردادی زمانی است که کرنش محوری (ε_a) برابر ۰/۱۵ باشد (۱، ۲ و ۳). پارامترهای مقاومت فشاری غیرمحصور به

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

روش زیر محاسبه شد. کرنش محوری (ε_a) خاک با رابطه زیر محاسبه شد:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [۶]$$

که در آن ΔL مقدار جابه‌جایی عمودی اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله جابجایی‌سنج و L_0 ارتفاع اولیه نمونه خاک می‌باشند. برای محاسبه سطح مقطع نمونه خاک در طول بارگذاری و هنگام گسیختگی از فرمول زیر استفاده شد:

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon_a} \quad [۷]$$

که A سطح مقطع نمونه پس از بارگذاری و A_0 سطح مقطع اولیه نمونه می‌باشند. تنش اصلی اول (σ_1) با فرمول زیر محاسبه شد:

$$\sigma_1 = \frac{F_a}{A} \quad [۸]$$

که در آن F_a نیروی محوری واردشده به نمونه خاک می‌باشد. اندازه‌گیری نیرو در آزمون UCS برای نمونه‌های خشک‌تر با استفاده از رینگ نیرو با دقت ۶/۸۹ نیوتن و برای نمونه‌های مرطوب‌تر با استفاده از رینگ نیرو با دقت ۰/۵۶۳ نیوتن انجام شد. در نهایت مقاومت فشاری غیرمحصور(UCS) (برای تمامی نمونه‌ها) با فرمول زیر محاسبه شد:

$$\mathrm{UCS} = (\sigma_1)_{max} = \left(\frac{F_a}{A}\right)_{max} \quad [۹]$$

که در آن $(\sigma_1)_{max}$ تنش اصلی اول بیشینه است که در هنگام گسیختگی به نمونه خاک وارد می‌شود.

آزمون مقاومت فروروی (PR)

مقاومت فروروی با استفاده از دستگاه فروسنج ریز با زاویه مخروط ۳۰ درجه، قطر قاعده مخروط ۴ میلی‌متر و با سرعت فروروی ۲ میلی‌متر در دقیقه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری نیرو با رینگ نیرو با دقت ۰/۵۶۳ نیوتن و در ۳ نقطه و در هر نقطه در ۳ عمق (۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ سانتی‌متر) انجام شد. سپس از این ۹ اندازه‌گیری برای هر نمونه خاک، میانگین هندسی گرفته شد:

$$F_{average} = \sqrt[9]{\prod_{i=1}^{9} F_i} \quad [۱۰]$$

که در آن $F_{average}$ میانگین هندسی نیرو و F_i مقدار نیرو در هر یک از اندازه‌گیری‌ها می‌باشند. در نهایت مقاومت فروروی (PR) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\mathrm{PR} = \frac{F_{average}}{A_{cone}} \quad [۱۱]$$

که در آن A_{cone} سطح قاعده مخروط فروسنج می‌باشد.

برازش مدل نمایی بر داده‌های مقاومت مکانیکی خاک

مدل نمایی بر داده‌های مقاومت مکانیکی (ITS، UCS و PR) در برابر مقدار رطوبت خاک برازش داده شد (۲۶). برازش مدل با نرم‌افزار Excel انجام گرفت. مدل استفاده‌شده به‌صورت زیر است:

$$\mathrm{Strength} = a.\exp(-b.w) \quad [۱۲]$$

که در آن Strength مقاومت مکانیکی، w مقدار رطوبت وزنی خاک و a و b پارامترهای مدل می‌باشند. شیب در معادله ۱۲ (یعنی مقدار b)، می‌تواند شاخصی از سخت‌شوندگی خاک باشد زیرا خاکی که تغییر مقاومت مکانیکی با تغییر مقدار رطوبت در آن شدت بیشتری داشته باشد بیشتر مستعد سخت‌شوندگی است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. خاک شماره ۲ با ۴۰ درصد بیشترین و خاک شماره ۸ با ۱۲/۱ درصد کمترین مقدار رس را داشتند. کمترین درصد سیلت ۲۴/۷ و بیشترین آن ۵۵/۹ درصد بود. مقدار شن نیز بین ۱۵/۶ تا ۶۲/۸ درصد متغیر بود. بیشترین درصد ماده آلی مربوط به خاک شماره ۵ با ۲/۶۶ درصد و کمترین آن مربوط به خاک شماره ۸ با ۰/۳۰ درصد بود. مقدار کربنات کلسیم خاک‌ها بین ۳۹/۰ درصد برای خاک شماره ۲ و ۳/۰ درصد برای خاک شماره ۹ متغیر بود. مقدار سنگ‌ریزه نیز در خاک‌ها بین ۱۳/۳ و ۰/۱ درصد متغیر بود. دامنه گسترده مقادیر این

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

شماره خاک	نام خاک	رس	سیلت	شن	ماده آلی	کربنات کلسیم	سنگ‌ریزه	چگالی حقیقی	$0/9BD_{critical}$	بافت خاک	رده‌بندی خاک (USDA)
		----------	----------	----------	%w/w	----------	----------	$Mg\ m^{-3}$	$Mg\ m^{-3}$		
۱	ده پیاز	۳۱/۰	۳۸/۹	۳۰/۰	۲/۴۲	۱۴/۵	۲/۳	۲/۴۳	۱/۴۵۳	لوم رسی	Typic Xerofluvent
۲	آق بلاغ	۴۰/۰	۴۱/۳	۱۸/۶	۱/۰۴	۳۹/۰	۱/۴	۲/۵۸	۱/۳۹۱	رس سیلتی	Typic Calcixerept
۳	هارون‌آباد	۳۵/۳	۴۹/۰	۱۵/۶	۱/۰۷	۲۹/۵	۲/۲	۲/۵۷	۱/۴۲۸	لوم رسی سیلتی	Typic Calcixerept
۴	امزاجرد	۲۳/۵	۴۸/۹	۲۷/۶	۲/۰۲	۱۳/۰	۱/۰	۲/۵۷	۱/۵۲۰	لوم	Typic Haploxerept
۵	بهار	۲۸/۴	۳۶/۳	۳۵/۳	۲/۶۶	۱۰/۵	۲/۰	۲/۵۸	۱/۴۸۱	لوم رسی	Typic Calcixerept
۶	جوکار	۱۳/۱	۵۵/۹	۳۱/۰	۰/۸۱	۱۴/۰	۰/۱	۲/۶۴	۱/۵۹۶	لوم سیلت	Typic Haploxerept
۷	مسلم‌آباد	۲۲/۰	۴۰/۰	۳۷/۹	۱/۲۴	۳۶/۰	۱۳/۳	۲/۶۰	۱/۵۳۴	لوم	Typic Xerorthent
۸	حسین‌آباد	۱۲/۱	۲۵/۱	۶۲/۸	۰/۳۰	۸/۰	۳/۰	۲/۶۱	۱/۶۰۳	لوم شنی	Typic Xerorthent
۹	مرکز تحقیقات	۲۱/۴	۲۴/۷	۵۳/۹	۰/۵۰	۳/۰	۵/۶	۲/۶۰	۱/۵۳۴	لوم رسی شنی	Typic Calcixerept
میانگین		۲۵/۲	۴۰/۰	۳۴/۸	۱/۳۴	۱۸/۶	۳/۴	۲/۵۷	۱/۵۰۴		
انحراف معیار		۹/۴	۱۰/۵	۱۵/۳	۰/۸۳	۱۲/۹	۴/۰	۰/۰۶	۰/۰۷۲		

ویژگی‌ها در خاک‌های مورد بررسی این امکان را فراهم نمود که اثر ویژگی‌های ذاتی خاک بر پدیده سخت‌شوندگی به‌خوبی بررسی گردد.

مقاومت مکانیکی خاک‌ها

مقاومت کششی (ITS)

مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات ITS خاک‌های مورد بررسی و هم‌چنین مقادیر ITS نمونه‌های خاک در رطوبت هوا-خشک در جدول ۲ آورده شده است. خاک شماره ۳ با داشتن کمترین مقدار شن در بین خاک‌های مورد بررسی، در چگالی ظاهری $0/9BD_{critical}$ دارای بیش‌ترین مقادیر ITS بیشینه بود. هم‌چنین خاک شماره ۹ که دارای کمترین مقدار کربنات کلسیم در بین خاک‌های مورد بررسی بود، دارای کمترین مقدار ITS بیشینه بود (جدول ۲). بنابراین می‌توان گفت مقدار کربنات کلسیم می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر مقدار مقاومت کششی در خاک‌های مورد بررسی داشته باشند. اثر افزایشی مقدار رس بر مقاومت مکانیکی خاک در این پژوهش، با یافته‌های لی و همکاران (۱۲ و ۱۳) هماهنگی داشت.

براساس تعریف پیشنهادی در سمپوزیوم جهانی خاک‌های سخت‌شونده و سله‌دار به IUSS، مقاومت کششی خاک سخت‌شونده هوا-خشک باید بزرگ‌تر یا برابر ۹۰ kPa باشد (۱۹). با توجه به اعداد جدول ۲، می‌توان گفت که تنها خاک شماره ۱ (نسبتاً ریزبافت)، سخت‌شونده محسوب می‌شود. هم‌چنین خاک‌های شماره ۳ و ۲ نیز به‌ترتیب پس از خاک شماره ۱ در مقایسه با سایر خاک‌های مورد بررسی، دارای بیش‌ترین مقدار مقاومت کششی هوا-خشک بودند. این نتایج نشان می‌دهد، افزایش مقدار رس (البته تا حدی) می‌تواند

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

جدول ۲. مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خاک و مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های هوا-خشک

شماره خاک	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	مقاومت کششی هوا-خشک
	kPa				٪	(kPa)
۱	۱۰۵/۵	۰	۵۶/۶	۴۱/۶	۷۳/۵	۹۸/۵
۲	۶۶/۷	۰	۳۱/۵	۲۶/۱	۸۲/۸	۵۲/۸
۳	۱۱۳/۷	۰	۴۴/۴	۳۷/۳	۸۳/۹	۷۵/۲
۴	۵۸/۲	۰	۳۱/۲	۲۲/۵	۷۲/۱	۴۸/۵
۵	۵۲/۲	۰	۲۳/۵	۲۰/۵	۸۶/۹	۴۹/۳
۶	۵۱/۷	۰	۱۱/۶	۱۵/۱	۱۳۰/۰	۳۸/۴
۷	۵۶/۵	۰	۲۳/۲	۱۹/۳	۸۳/۳	۳۴/۸
۸	۶۷/۹	۰	۱۱/۹	۱۹/۹	۱۶۶/۰	۴۰/۴
۹	۴۴/۶	۰	۱۰/۵	۱۳/۶	۱۲۹/۰	۴۴/۶

موجب افزایش مقاومت کششی در رطوبت هوا-خشک شود. می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌هایی با بافت متوسط، بیش‌تر مستعد سخت‌شوندگی هستند. این یافته با نتایج پژوهش‌های لی و همکاران (۱۲و ۱۳) و دکستر (۵) هماهنگی دارد.

مقاومت فشاری غیرمحصور (UCS)

مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات داده‌های UCS خاک‌های مورد بررسی در جدول ۳ آورده شده است. خاک شماره ۱ بیشترین و خاک شماره ۸ کمترین مقدار UCS بیشینه و میانگین را داشتند. همانند آنچه در مورد اثر مقدار رس بر مقادیر ITS هوا-خشک بیان گردید، می‌توان گفت مقدار رس اثر افزایشی بر مقادیر UCS نیز داشته است. هم‌چنین با توجه به جدول ۳، دیده می‌شود که خاک شماره ۷ که دارای مقدار زیاد کربنات کلسیم می‌باشد، پس از خاک شماره ۱، بیشترین مقدار UCS بیشینه را دارا می‌باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اثر مقدار کربنات کلسیم بر مقاومت مکانیکی خاک‌ها می‌تواند افزایشی باشد. مصدقی و همکاران (۱۶ و ۱۷) نیز دریافتند که مقاومت مکانیکی با افزایش کربنات کلسیم افزایش می‌یابد. کربنات کلسیم مانند سیمانی بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث گردیده، خاک بیش‌تر مستعد سخت‌شوندگی شود. در خاک شماره ۸ کم‌ترین مقدار رس و ماده آلی و بیشترین مقدار شن در مقایسه با سایر خاک‌ها دیده شده است. در نتیجه این خاک دارای مواد پیونددهنده بین ذرات درشت شن و عوامل خاکدانه‌سازی (رس و ماده آلی) کمی بوده و این ویژگی موجب شده است که کم‌ترین مقدار UCS بیشینه را داشته باشد.

مقاومت فروروی (PR)

مقادیر بیشینه، کمینه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات داده‌های مقاومت فروروی (PR) خاک‌های مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است. PR در مقایسه با دو مقاومت مکانیکی دیگر، دارای مقادیر بسیار بزرگ‌تری است. همانند آنچه در مورد مقادیرUCS بیان گردید، مقدار زیاد سنگ‌ریزه و هم‌چنین مقدار نسبتاً زیاد کربنات کلسیم در خاک شماره ۷، می‌تواند دلیلی برای بیشترین مقدار PR در آن باشد. هم‌چنین می‌توان گفت که خاک شماره ۹ به دلیل دارابودن کمترین مقدار کربنات کلسیم، مقدار نسبتاً کم ماده آلی و مقدار نسبتاً زیاد شن، کمترین مقدار PR را داشت. این

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

جدول ۳. مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مقاومت فشاری غیرمحصور نمونه‌های خاک

شماره خاک	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	kPa				٪
۱	۱۰۴۲/۰	۱۴/۸	۳۹۹/۴	۳۱۸/۶	۷۹/۷
۲	۷۰۹/۲	۵/۰	۳۴۳/۲	۲۷۴/۳	۷۹/۹
۳	۵۱۳/۳	۰	۲۱۸/۲	۱۶۲/۴	۷۴/۴
۴	۶۰۲/۵	۰	۳۰۰/۱	۱۹۵/۴	۶۵/۱
۵	۴۰۷/۲	۷/۰	۲۰۳/۰	۱۶۲/۱	۷۹/۸
۶	۴۴۳/۷	۰	۱۲۲/۰	۱۲۸/۲	۱۰۵
۷	۹۵۶/۲	۰	۳۳۸/۴	۳۱۳/۹	۹۲/۷
۸	۲۷۷/۱	۰	۸۹/۵	۹۶/۱	۱۰۷
۹	۳۸۵/۴	۰	۱۶۸/۴	۱۵۱/۶	۹۰

جدول ۴. مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین مقاومت فروروی نمونه‌های خاک

شماره خاک	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	kPa				٪
۱	۸۶۲۸	۲۱۹/۱	۴۳۶۷	۳۲۳۸	۷۴/۱
۲	۶۲۴۰	۶۴/۷	۳۳۲۲	۲۳۸۱	۷۱/۶
۳	۸۴۰۰	۹۷/۹	۳۹۲۳	۳۱۲۳	۷۹/۶
۴	۹۸۰۰	۵۱/۰	۴۷۹۴	۳۶۲۵	۷۵/۶
۵	۷۳۸۶	۹۴/۱	۳۲۶۲	۲۷۹۸	۸۵/۷
۶	۷۵۵۶	۲۱/۳	۲۵۵۳	۲۶۷۲	۱۰۵/۰
۷	۱۰۰۵۳	۴۴/۴	۳۸۷۸	۳۴۷۹	۸۹/۷
۸	۴۸۷۸	۲/۲	۱۷۱۶	۱۷۱۲	۹۹/۷
۹	۳۵۹۴	۸/۹	۱۶۳۵	۱۳۹۰	۸۵/۰

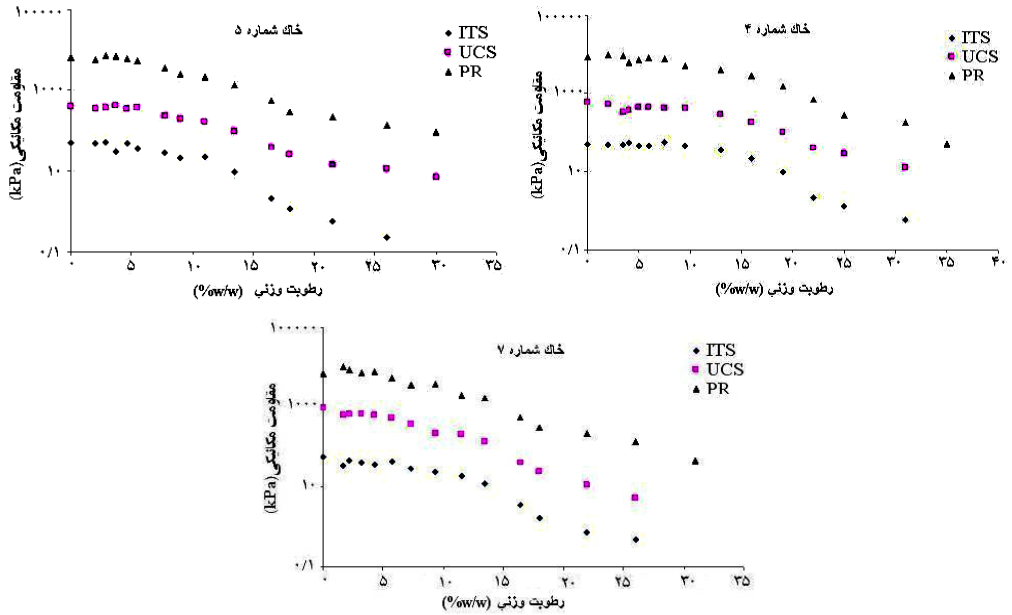
نتایج با یافته‌های مصدقی و همکاران (۱۶ و ۱۷) هماهنگی دارد که ذرات ریز کربنات کلسیم در خاک می‌توانند مانند ذرات رس در افزایش مقاومت مکانیکی نقش ایفا کنند.

روند کلی تغییرات مقادیر مقاومت مکانیکی در برابر مقدار رطوبت خاک

روند کلی کاهشی مقادیر هر سه نوع مقاومت مکانیکی با افزایش مقدار رطوبت در تمامی خاک‌ها دیده شد. برای نمونه این روند در ۳ خاک از خاک‌های مورد بررسی در شکل ۱ آورده شده است. در این شکل مقادیر مقاومت مکانیکی به دلیل دامنه گسترده تغییرات با مقیاس لگاریتمی رسم شدند. برای هر سه نوع مقاومت مکانیکی، روند کاهشی نسبتاً خطی (در مقیاس لگاریتمی) با افزایش مقدار رطوبت، به خوبی مشخص است. هم‌چنین در همه خاک‌های مورد بررسی، بیشترین مقادیر مقاومت مکانیکی مربوط به مقاومت فروروی و کمترین آن مربوط به مقاومت کششی بوده است. اگرچه داده‌های مقاومت

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]



شکل ۱. نمونه‌هایی از روند کاهشی هر سه نوع مقاومت مکانیکی با افزایش مقدار رطوبت خاک

مکانیکی خاک با خشک‌شدن نوسان‌هایی داشت، ولی در بیش‌تر خاک‌های مورد بررسی، کمترین مقدار مقاومت مکانیکی به رطوبت نزدیک اشباع و بیشترین آن به رطوبت صفر (آون–خشک) مربوط بود.

نسبت‌های UCS/ITS، PR/ITS و PR/UCS

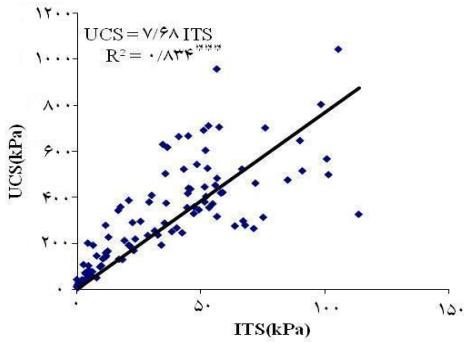
الف) UCS/ITS

همان‌گونه که در بخش‌های پیشین دیده شد، مقادیر UCS نسبت به مقادیر ITS بزرگ‌تر بودند. نسبت بین این دو مقاومت مکانیکی در پژوهش‌های متعددی مورد بحث قرار گرفته و مقادیر متفاوتی برای آن توسط پژوهش‌گران مختلف گزارش شده است. شکل ۲، همه داده‌های UCS در برابر ITS برای خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. شیب رابطه UCS با ITS در این پژوهش برابر ۷/۶۸ به‌دست آمده است که با نتایج پژوهش‌های مصدقی و همکاران (۱۴ و ۱۵) (نسبت برابر ۶) و یانگ و مولینز (۲۷) (نسبت برابر ۶/۳) کمی تفاوت داشت. این نتیجه به نسبت نظری ۸ به ۱ برای اجسام کشسان ارائه شده توسط گریفیت بسیار نزدیک بوده و با مقدار شیب برابر ۳/۸ گزارش‌شده توسط پانایوتوپولوس(۲۴) بسیار متفاوت بود. کولن و وندراگر (۱۱) نیز هماهنگ با نظریه گریفیت، نسبت ۸ به ۱ را برای نمونه‌های بازساخته‌شده سه خاک کشاورزی به‌دست آوردند. دلیل انحراف این نسبت از عدد ۸ (در نظریه گریفیت) آن است که براساس نظریه گریفیت، ماده مورد بررسی باید کشسان و همگن و همسان‌گرد باشد و این نظریه برای مواد غیرکشسان و ناهمگن و ناهمسان‌گرد مانند خاک‌های کشاورزی دارای خطا خواهد بود (۱۴ و ۱۵).

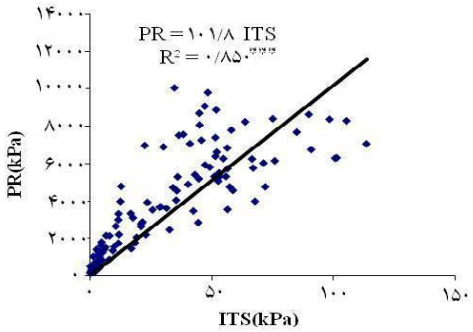
ب) PR/ITS و PR/UCS

نسبت بین مقاومت فروروی و مقاومت کششی و هم‌چنین نسبت بین مقاومت فروروی و مقاومت فشاری غیرمحصور در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳، همه داده‌های PR در برابر ITS و شکل ۴ نیز همه داده‌های PR در برابر UCS برای خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. روابط رگرسیونی به‌دست آمده رابطه قوی بین مقاومت‌های مکانیکی خاک را نشان می‌دهند. شیب‌های روابط PR با ITS و PR با UCS به‌ترتیب برابر ۱۰۱/۸ و ۱۲/۳ به‌دست آمده است (شکل‌های ۳ و ۴). با

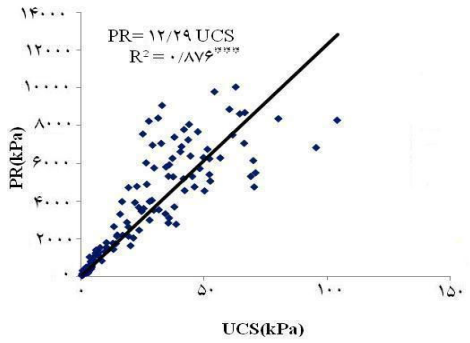
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]



شکل ۲. مقادیر مقاومت فشاری غیرمحصور (UCS) در برابر مقاومت کششی (ITS) برای خاک‌های مورد بررسی



شکل ۳. مقادیر مقاومت فروروی (PR) در برابر مقاومت کششی (ITS) برای خاک‌های مورد بررسی

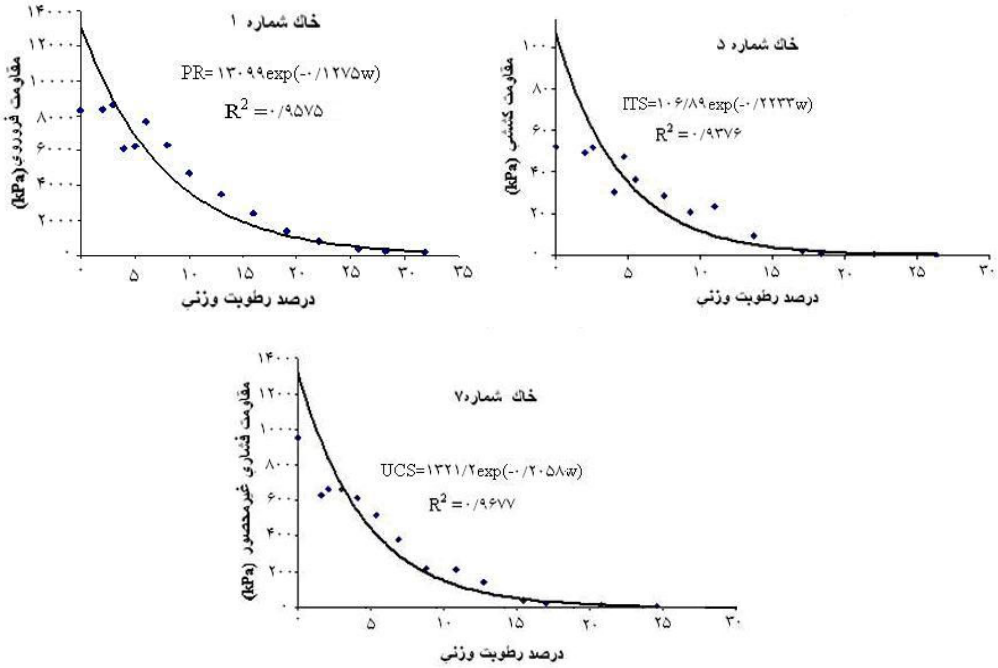


شکل ۴. مقادیر مقاومت فروروی (PR) در برابر مقاومت فشاری غیرمحصور (UCS) برای خاک‌های مورد بررسی

تعیین نسبت بین انواع مقاومت مکانیکی می‌توان با اندازه‌گیری یک شاخص مقاومت مکانیکی، بقیه شاخص‌های مقاومت را برآورد نمود. برای نمونه، با داشتن این نسبت‌ها برای خاک‌های استان همدان، می‌توان بدون اندازه‌گیری مستقیم تمامی مقاومت‌های مکانیکی، تنها با اندازه‌گیری یکی از انواع مقاومت‌ها (مانند مقاومت فروروی که اندازه‌گیری نسبتاً ساده‌تری دارد)، مقادیر دیگر مقاومت‌ها را به‌طور تقریبی به‌دست آورد و روند تغییرات مقادیر مقاومت مکانیکی با تغییر مقادیر رطوبت خاک را بررسی نمود. نتایج نشان می‌دهد که دقت برآوردها در مقادیر کم مقاومت مکانیکی، بیشتر است (شکل‌های ۲ تا ۴).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]



شکل ۵. نمونه‌هایی از برازش مدل نمایی بر داده‌های مقاومت مکانیکی خاک‌ها

جدول ۵. مقادیر پارامتر برازش مدل نمایی (b) و R^2 برای مقاومت‌های کششی، فشاری غیرمحصور و فروروی در برابر مقدار رطوبت خاک

شماره خاک	ITS		UCS		PR	
	b	R^2	b	R^2	b	R^2
۱	۰/۱۵۰۶	۰/۸۵	۰/۱۳۶۰	۰/۹۶	۰/۱۲۷۵	۰/۹۶
۲	۰/۲۲۱۲	۰/۹۳	۰/۱۶۰۳	۰/۹۵	۰/۱۴۸۴	۰/۹۳
۳	۰/۱۸۵۸	۰/۸۸	۰/۱۲۸۳	۰/۸۵	۰/۱۴۷۸	۰/۹۴
۴	۰/۱۵۵۷	۰/۸۶	۰/۱۲۳۱	۰/۹۲	۰/۱۴۸۱	۰/۹۴
۵	۰/۲۲۳۳	۰/۹۴	۰/۱۵۶۶	۰/۹۶	۰/۱۵۹۷	۰/۹۷
۶	۰/۱۱۶۴	۰/۸۳	۰/۰۹۷۷	۰/۸۶	۰/۱۳۵۹	۰/۹۲
۷	۰/۱۹۵۱	۰/۹۲	۰/۲۰۵۸	۰/۹۷	۰/۱۷۷۷	۰/۹۷
۸	۰/۳۷۰۴	۰/۹۴	۰/۲۵۹۴	۰/۹۸	۰/۲۵۶۹	۰/۹۴
۹	۰/۵۸۶۴	۰/۸۵	۰/۳۴۲۹	۰/۹۱	۰/۲۶۸۷	۰/۹۶

نتایج برازش مدل نمایی بر داده‌های مقاومت مکانیکی خاک

مدل نمایی بر داده‌های هر سه نوع مقاومت مکانیکی در برابر مقدار رطوبت خاک، برازش داده شد (شکل ۵) و به خوبی روند کلی کاهشی مقاومت مکانیکی با افزایش مقدار رطوبت خاک، دیده شد. مقادیر b (شیب مدل نمایی) و R^2 این مدل برای هر سه نوع مقاومت مکانیکی در جدول ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است که b بیان‌گر شیب افزایش مقاومت مکانیکی با کاهش رطوبت بوده و ممکن است لزوماً روند تغییر آن با روند تغییر مقاومت مکانیکی که در بحث‌های ابتدایی اشاره شد، هم‌خوانی نداشته باشد. همان‌گونه که پیش از این

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

جدول ۶. روابط معنی‌دار پارامتر b در مدل نمایی مربوط به سه مقاومت مکانیکی و برخی ویژگی‌های خاک و روابط بین مقادیر b برای سه مقاومت مکانیکی خاک

مقاومت مکانیکی	رابطه خطی	ضریب تبیین	درجه معنی‌داری
ITS	$b = 0.7114 - 0.0116\%\text{Silt}$	$R^2 = 0.70$	$p < 0.005$
	$b = 0.0047 + 0.0069\%\text{Sand}$	$R^2 = 0.52$	$p < 0.030$
UCS	$b = 0.4433 - 0.0066\%\text{Silt}$	$R^2 = 0.79$	$p < 0.001$
	$b = 0.0372 + 0.0041\%\text{Sand}$	$R^2 = 0.64$	$p < 0.010$
PR	$b = 0.3412 - 0.0042\%\text{Silt}$	$R^2 = 0.71$	$p < 0.004$
	$b = 0.0707 + 0.0030\%\text{Sand}$	$R^2 = 0.77$	$p < 0.002$
UCS و ITS	$b_{UCS} = 0.053 + 0.51 b_{ITS}$	$R^2 = 0.92$	$p < 0.00005$
PR و ITS	$b_{PR} = 0.094 + 0.327 b_{ITS}$	$R^2 = 0.85$	$p < 0.0003$
	$b_{PR} = 0.061 + 0.631 b_{UCS}$	$R^2 = 0.90$	$p < 0.00009$

بیان شد، مقدار b می‌تواند شاخصی از سخت‌شوندگی خاک‌ها باشد. بنابراین رابطه پارامتر b با برخی ویژگی‌های ذاتی خاک‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. روابط معنی‌دار بین پارامتر b در مدل نمایی مربوط به سه مقاومت مکانیکی و ویژگی‌های خاک، در جدول ۶ نشان داده شده است.

با توجه به روابط جدول ۶، می‌توان دریافت که با افزایش مقدار سیلت، پارامتر b برای هر سه نوع مقاومت مکانیکی کاهش یافت. چنین یافته‌ای به این مفهوم است که سیلت در کاهش استعداد سخت‌شوندگی خاک‌ها مؤثر است. رابطه مثبت بین b و مقدار شن نیز نشان می‌دهد که افزایش مقدار شن در خاک، پدیده سخت‌شوندگی را افزایش داده است. نیکو و چوپارت (۲۲) و سینکلیر (۲۵) نیز به یافته‌های مشابهی در مورد خاک‌های سنگال رسیدند. بنابراین می‌توان گفت، ذرات شن به عنوان مکانی (ذرات اسکلتی) برای قرارگرفتن و رسوب ذرات ریز روی و بین آنها (پل) عمل کرده و سبب افزایش قفل‌شدگی و اصطکاک بین ذرات و نرخ افزایش مقاومت مکانیکی با کاهش مقدار رطوبت خاک می‌شوند. در خاک‌های بدون ساختمان یا با ساختمان ضعیف و دارای پیکره دانه‌های منفرد شن، در هنگام مرطوب‌شدن ذرات سیلت و رس (مواد ریز) به فضاهای بین دانه‌های شن وارد شده یا به عنوان پل‌های اتصال‌دهنده دانه‌ها عمل کرده و یا به سطح دانه‌های شن متصل می‌شوند. در خاک‌های سخت‌شونده، ذرات سیلت ریز و رس، پیوندهایی بین ذرات درشت‌تر (شن) تشکیل داده و مقاومت برشی این پیوندها هم‌زمان با کاهش مقدار آب و افزایش مکش ماتریک، افزایش می‌یابد. مولینز و پانایوتوپولوس (۲۱) این اثر را با اندازه‌گیری مقاومت‌های کششی و برشی مخلوط‌های ساخته‌شده شن-کائولین در مقادیر مختلف رطوبت، بررسی کردند. آنها در پژوهش خود مشاهده نمودند که نمونه‌های با مقدار رس (کائولین) بیشتر، مقاومت مکانیکی بیشتری نیز داشتند، زیرا همانند آنچه پیش از این نیز بیان گردید، ذرات ریز رس بین ذرات درشت شن پیوند برقرار می‌کنند. هم‌چنین آنها دریافتند که در هر مقدار رطوبت و در هر مقدار رس (کائولین)، مخلوط‌های شن ریز- کائولین نسبت به شن درشت-کائولین، مقاومت مکانیکی بیشتری از خود نشان دادند. نمونه‌های دارای شن درشت، ناهمگنی بیشتری داشته و ذرات رس به‌خوبی نتوانستند بین ذرات شن درشت پل ایجاد کنند و قفل‌شدگی مانند آنچه در مورد شن ریز رخ می‌دهد، انجام نگرفت و در نتیجه مقدار مقاومت مکانیکی کم‌تر شد. روابط به‌دست آمده

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

بین مقادیر b برای هر سه نوع مقاومت مکانیکی، روابطی مثبت با ضریب تبیین و درجه معنی‌داری زیاد می‌باشند. این روابط نشان می‌دهند که بین مقادیر b برای مقاومت‌های مکانیکی مختلف، هماهنگی خوبی وجود داشته و این هماهنگی نیز روند مشابه تغییرات مقاومت مکانیکی با رطوبت خاک را بیان می‌دارد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر روی ۹ سری خاک از استان همدان برای بررسی پدیده سخت‌شوندگی با اندازه‌گیری مقاومت کششی (ITS)، فشاری غیرمحصور (UCS) و فروروی (PR) در نمونه‌های بازساخته‌شده خاک انجام شد. در تمامی خاک‌های مورد بررسی، با افزایش مقدار رس، مقدار ITS افزایش یافت. هم‌چنین اثر افزایشی مقدار رس بر UCS و اثر افزایشی مقدار کربنات کلسیم بر PR دیده شد. کربنات کلسیم مانند سیمانی بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث گردیده که خاک بیشتر مستعد سخت‌شوندگی شود. هم‌چنین، روند کاهشی مقادیر مقاومت مکانیکی با افزایش مقدار رطوبت خاک دیده شد. شیب مدل نمایی برازش‌یافته بر منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی به عنوان شاخص سخت‌شوندگی، رابطه‌ای مثبت با مقدار شن و رابطه‌ای منفی با مقدار سیلت خاک برقرار کرد. در کل، بافت و مقدار کربنات کلسیم از عوامل مهم و مؤثر بر پدیده سخت‌شوندگی در خاک‌های همدان می‌باشند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه بوعلی‌سینا به دلیل تأمین هزینه‌های این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. وفاییان، م. ۱۳۶۹. *آزمایش‌های مکانیک خاک*. نشر قوس شفق، اصفهان.

2. Bowles, J.E. 1978. Engineering Properties of Soils and Their Measurement. 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., New York.
3. Bowles, J.E. 1979. Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw-Hill Book Co.,
4. Dexter, A.R. 2004a. Soil physical quality. Part I Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Geoderma 120: 201–214.
5. Dexter, A.R. 2004b. Soil physical quality. Part II: Friability, tillage, tilth and hard-setting. Geoderma 120: 215–226.
6. Dexter, A.R. 2004c. Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. Geoderma 120: 227–239.
7. Dexter, A.R. and B. Kroesbergen.1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. J. Agric. Eng. Res. 31: 139–147.
8. FAO-UNESCO. 1974. Soil Map of the World 1:5000000. I-X.UNESCO, Paris, France.
9. Frydman, S. 1964. The applicability of the Brazilian (indirect tension) test to soils. Aust. J. Appl. Sci. 15: 335–343.
10. Jones, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Sci. Soc. Amer. J. 47: 1208–1211.
11. Koolen, A.J. and P. Vaandrager. 1984. Relationships between soil mechanical properties. J. Agric. Eng. Res. 29: 313–319.
12. Ley, G.J., C.A. Mullins and R. Lal. 1989. Hard-setting behaviour of some structurally weak tropical soils. Soil Till. Res. 13: 365– 381.
13. Ley, G.J., C.A. Mullins and R. Lal. 1995. The potential restriction to root growth in structurally weak Tropical soils. Soil Till. Res. 33: 133–142.
14. Mosaddeghi, M.R., A. Hemmat, M.A. Hajabbasi and A. Alexandrou. 2003a. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. Soil Till. Res. 70: 53–64.
15. Mosaddeghi, M.R., A.J. Koolen, A. Hemmat and M.A. Hajabbasi. 2003b. Effects of internal and external forces on pre-compaction stress and air permeability of five soils from central Iran. International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) 16th Triennial Conference, July 13–18, Brisbane, Australia. pp: 767–773

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]

16. Mosaddeghi, M.R., M.A. Hajabbasi and H. Khademi. 2006a. Tensile strength of sand, palygorskite and calcium carbonate mixtures and interpretation with the effective stress theory. Geoderma 134: 160–170.
17. Mosaddeghi, M.R., M.A. Hemmat, M.A. Hajabbasi, M. Vafaeian and A. Alexandrou. 2006b. Plate Sinkage versus confined compression tests for in situ soil compressibility studies. Biosys. Eng. 93(3): 325–334.
18. Mosaddeghi M.R., M. Morshedizad, A.A. Mahboubi, A.R. Dexter and R. Schulin. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. Soil Till. Res. 105: 242–250
19. Mullins, C.E. 2000. Hardsetting soils. PP: G65–G87. *In:* Sumner, M.E. (Ed.), Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, FL.
20. Mullins, C.E., D.A. Macleod, E.H. Northcote, J.M. Tisdall and I.M. Young. 1990. Hardsetting soils: behaviour, occurrence and management. Adv. Soil Sci. 11: 37–108.
21. Mullins, C.E. and K.P. Panayiotopoulos. 1984. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. J. Soil Sci. 35: 459–468.
22. Nicou, R. and J.L. Chopart. 1979. Root growth and development in sandy and sandy clay soils of Senegal. PP: 373–384. *In:* R. Lal and D.J. Greenland (Eds.), Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. Wiley Interscience, Chichester.
23. Northcote, K.H. 1960,1971,1979. A factual key for the recognition of Australian soils, 1st, 3rd, and 4th eds. Rellim Tech. Pub., Adelaide, South Australia.
24. Panayiotopoulos, K.P. 1996. The effect of matric suction on stress-strain relation and strength of three Alfisols. Soil Till. Res. 39: 45–59.
25. Sinclair, J. 1985. Crusting, Soil Strength and Seedling Emergence in Bostwana. PhD Thesis, Aberdeen University.
26. To, J. and B.D. Kay. 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. Geoderma 126: 261–276.
27. Young, I.M. and C.E. Mullins. 1991. Factors affecting the strength of undisturbed cores from soils with low structural stability. J. Soil. Sci. 42: 205–217.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-02-05]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.14.1]