بررسی تأثیر پالیگورسکیت و بنتونیتدر مخلوط با شن بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری

نینا ارزانی [۱]، محمدرضا مصدقی [۲]، شمس الله ایوبی [۳] و عباس همت [۴]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم‌خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان ،۲- دانشیار گروه علوم‌خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳-استاد گروه علوم‌خاک گروه علوم‌خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان ،۴- استاد گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده
حدود آتربرگ (حد روانی، LL؛ حد خمیری، PL؛ حد انقباض، SL) و شاخص‌های پایداری (شاخص خمیری، PI؛ شاخص تردی، FI) در بررسی رفتار مکانیکی و مدیریت خاک سودمند هستند. این حدود و شاخص‌ها وابستگی زیادی به نوع و مقدار رس دارند. از روش‌های ساده و دقیق برای بررسی تأثیر یک کانی رسی مشخص بر ویژگی‌ها و رفتار خاک، ساختن مخلوط‌های شن-رس با ترکیب مشخص است. در این پژوهش تأثیر دو کانی رسی پالیگورسکیت و بنتونیت اشباع از کاتیون تبادلی کلسیم در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵% بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری مخلوط شن-کانی بررسی شد. نتایج نشان داد بیش‌ترین تأثیر بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری مربوط به کانی پالیگورسکیت و سپس بنتونیت بوده و افزایش مقدار رس باعث افزایش مقادیر این حدود و شاخص‌ها گردید. بیش‌ترین شاخص فعالیت مربوط به تیمار ۴۵% پالیگورسکیت و کم‌ترین آن مربوط به تیمار ۱۵% بنتونیت بود.
واژه‌های کلیدی: حدود آتربرگ، شاخص‌های پایداری، رفتار مکانیکی، پالیگورسکیت، بنتونیت

مقدمه
خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی و زیربنای کلیه فعالیت‌های کشاورزی و محیط تغذیه و بستر طبیعی رشد و نمو گیاهان است. شناخت ویژگی‌های خاک اولین قدم در جهت پیشرفت در امر کشاورزی محسوب می‌شود. کانی‌هایمعدنی قسمت عمده بخش جامد خاک را تشکیل داده‌اند (Brady & Weil, ۱۹۹۸).بنابراین شناسایی و توصیف رفتار کانی‌های رسی به ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک‌ها کمک می‌کند(Brady & Weil, ۱۹۹۸) .پژوهش‌های انجام‌گرفته در مورد ترکیبات خاک و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های خاک به دو دسته تقسیم می‌شوند: در روش اول پژوهش بر روی خاک طبیعی صورت می‌گیرد؛ علی‌رغم اندازه‌گیری در خاک طبیعی با این‌حال از معایب این روش دشوار و زمان‌بر بودن بررسی ترکیبی ویژگی‌ها می‌باشد زیرا خاک یک محیط پیچیده بوده که عوامل متعددی مانند نوع کانی‌های موجود، حضور یا عدم حضور مواد آلی و آهک برویژگی‌های مورد اندازه‌گیری تأثیرگذار است. در روش دوم خاک‌هایی با ترکیب معلوم با مخلوط‌نمودن کانی‌ها یا رس‌های با درجه خلوص مناسب، با یکدیگر و یا با سیلت و شن ساخته می‌شوند. این روش بسیار ساده‌تر بوده با این حال ممکن است رفتار و ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده برای کانی‌های خالص دقیقاً شبیه رفتار و برابر ویژگی‌هایخاک‌های طبیعی نباشند. اگرچه تأثیر ترکیباتی مانند ماده آلی، اکسیدها و رس‌ها و کاتیون‌های تبادلی به خوبی با این روش قابل اندازه‌گیری هستند اما تاکنون به طور کامل بررسی نشده‌اند(Mitchell, ۱۹۹۳). در این پژوهش تأثیر نوع و مقدار رس با کاتیون تبادلی Ca^{2+} بر حدود و شاخص‌های پایداری مخلوط آنها با شن بررسی شده است.

سیلیکات‌های لایه‌ای مهم‌ترین کانی‌های ثانویه‌ای هستند که در جزء معدنی خاک یافت می‌شوند. از میان کانی‌های ۲:۱ سیلیکاتی، کانی‌هایی مانند پالیگورسکیت و بنتونیت فراوانی زیادی در خاک‌های مناطق خشک ایران دارند.ولی پژوهش‌های اندکی در مورد ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی این کانی‌ها انجام شده است(Ruiz-Hitzky, ۲۰۰۱). بنتونیت یک فیلوسیلیکات آلومینیوم‌دار است که عمدتاً از مونت‌موریلونیت یا کانی‌های گروه اسمکتیت تشکیل شده‌است(Birgatti et al, ۲۰۰۶). بنتونیت عمدتاً به دو نوع متورم و غیرمتورم تقسیم‌بندی می‌شوند، بنتونیت متورم دارای کاتیون تبادلی سدیم و بنتونیت غیرمتورم، کلسیم‌دار است. کانی‌های خانواده اسمکتیت گنجایش تبادل یونی زیاد، خاصیت شکل‌پذیری و انبساط وانقباض زیاد دارند. درکانی بنتونیت سدیم‌دار جذب یونی، شکل‌پذیری و انبساط و انقباض از نوع کلسیم‌دار آن بیش‌تر است. پالیگورسکیت جزء رس‌های سیلیکاتی رشته‌ای است که از کانی‌های منحصر به فرد و فراوان مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود(Khademi & Mermut, ۱۹۹۸). این ساختار بلوری غیرمعمول عامل عمده رفتارهای خاص فیزیکی-شیمیایی این کانی است(Galan & Singer, ۲۰۱۱).در مجموع این کانی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هم‌چون شکل ذرات کشیده و سوزنی‌شکل، سطح ویژه زیاد (بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ متر مربع بر گرم)، توان زیاد جذب عناصر غذایی، توان زیاد جذب آب (بیش از ۱۰۰% وزن رس) و جذب چربی و روغن (بیش از ۸۰% وزن رس) می‌باشند(Murray, ۲۰۰۷).

آتربرگ (۱۹۱۱) حدود و مرزی (براساس رطوبت وزنی) برای تمایز رفتارهای مکانیکی خاک‌های چسبنده پیشنهاد نمود که سه عدد از این حدود شامل حد روانی(LL)یا حد بالایی خمیرایی[۲۵](UPL)، حد خمیری(PL) یا حد پایینی خمیرایی[۲۶](LPL)و حد انقباض[۲۷](SL) شهرت جهانی داشته وحدود پایداری (قوام) یا حدود آتربرگ[۲۸]نام دارند (بای‌بوردی، ۱۳۸۸).تفاوت بین LLو PLبرابر شاخص خمیری یا خمیرایی[۲۹](PI)، تفاوت بین PLو SLبرابر شاخص تردی[۳۰](FI)و تفاوت بین LLو SL برابر شاخص انقباض[۳۱](SI)است.این سه شاخص (FI،PI و SI) شاخص‌های پایداری خاک[۳۲]نامیده‌می‌شوند(Campbell, ۲۰۰۱; McBride,۲۰۰۸). حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری خاک در مباحث مدیریتی کاربرد دارند، به طور مثال رطوبت PL در مدیریت خاک‌ورزی و تردد ماشین‌های کشاورزی و رطوبت SL در رابطه با انقباض و انبساط خاک‌ها استفاده می‌شود(Keller & Dexter, ۲۰۱۲). هم‌چنین این حدود و شاخص‌ها در طبقه‌بندی خاک‌های چسبنده برای اهداف مهندسی کاربرد دارند و در تخمین مقاومت برشی، توان باربری، تراکم‌پذیری، آماس‌پذیری و سطح ویژه خاک استفاده می‌شوند(Carter & Gregorich, ۱۹۹۳). رس، ماده آلی و CCE از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک تأثیرگذار بر حدود و شاخص‌های پایداری هستند. افزایش میزان رس باعث افزایش حدود آتربرگ(PL ،LL و SL) و پتانسیل انقباض و انبساط خاک می‌گردد(Mitchell, ۱۹۹۳). کلر و دکستر (۲۰۱۲) با بررسی حدود آتربرگ خاک‌های کشاورزی دریافتند که PLدر خاک‌های با رس بیش‌تر از ۳۵% هم‌بستگی قوی با درصد رس دارد و برای مقادیر کم‌تر رس، تحت تأثیر مقدار رس قرار نگرفت. هم‌چنین LL هم‌بستگی معنی‌داری با مقدار رس و PL هم‌بستگی معنی‌داری با ماده آلی نشان داد. درصد رس توانست ۷۹% از تغییرات ۵۸% ،LL از تغییرات PL و ۶۸% از تغییرات PI را توجیه کند(Keller &Dexter, ۲۰۱۲). در این پژوهش تأثیر دو کانی رسی پالیگورسکیت و بنتونیتاشباع از کاتیون تبادلی کلسیم در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵% بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری مخلوط شن-کانی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی کانی‌های مورد استفاده

کوارتز با خلوص ۹۸% و در محدوده اندازه ۳/ تا ۸/۰ میلی‌متر از معدن الوند همدان تهیه شد. پالیگورسکیت از انجمن کانی‌های رسی فلوریدا آمریکا در محدوده اندازه ۰۰۲/۰ میلی‌متر با درجه خلوص ۹۰ تا ۹۵ درصد و کانی بنتونیت از شرکت توما اصفهان خریداری شد. کانی‌های رسی از الک ۰۵۳/۰ میلی‌متر عبور داده شدند. با افزودن محلول ۵/۰ مولار $CaCl_2$ به وسیله یون Ca^{2+} اشباع گردیدند. املاح اضافی طی چند مرحله شست و شو خارج شد. بعد از خشک کردن کانی‌ها توسط دستگاه فریزدرایر، کانی‌ها مجدداً از ا الک ۰۵۳/۰ میلی‌مترعبور داده شدند. به منظور حذف گرد و غبار، ذرات کوارتز با اسید رقیق طی چند مرحله، تا زمانی که محلول رویی تقریباً شفاف شود، شست و ش و داده شد. در نهایت کانی‌های رسی در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵% با ش ن (کوارتز) مخلوط شدند.

اندازه‌گیری حدود و شاخص‌های پایداری آتربرگ

برای اندازه‌گیری حدودوشاخص‌های آتربرگ، کانی‌های رسی در نسبت‌های وزنی مورد نظر به مقدار حدودی ۲۰۰ گرم ساخته شده و از روش‌های استاندارد برای تعیین این حدود و شاخص‌ها استفاده شد. برای اندازه‌گیری حد روانی (LL) از روش سه-نقطه کاساگراند استفاده گردید(McGarry, ۲۰۰۲). برای تعیین حد خمیری (PL)، مخلوط شن-کانی به حدی مرطوب و ورز داده شد که فتیله‌ای از آن به طول ۷۵ میلی‌متر و قطر ۳ میلی‌متر ترک‌های طولی و عرضی بخورد. با خشک‌کردن این فتیله‌ها در دمای ۱۰۵ درجه،PL تعیین شد(McGarry, ۲۰۰۲).از تفاضل LLو PL، شاخص خمیری (خمیرایی)(PI) محاسبه شد(McGarry, ۲۰۰۲). اندازه‌گیری حد انقباض (SL) به روش استاندارد ۱۳۷۷- BSانجام شد(McGarry, ۲۰۰۲).از تفاضل PLو SL، شاخص تردی (FI) و ازتفاضل LLو SL، شاخص انقباض (SI)محاسبه شد(Campbell, ۲۰۰۱; McBride,۲۰۰۸) .با توجه به معین‌بودن درصد رس‌های کاربردی، شاخص فعالیت (A)(برابر نسبت PI به درصد رس) نیز محاسبه شد(Campbell, ۲۰۰۱; McBride,۲۰۰۸).تجزیه‌های آماری اثر مقدار و نوع کانی رسی بر حدود و شاخص‌های پایداری در سه تکرار و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار SAS ۹.۰ انجام گرفت.

نتایج و بحث

اثر نوع و درصد رس بر حدود و شاخص‌های پایداری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). میانگین حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداربه ترتیب پالیگورسکیت >بنتونیت و برای درصد رس به ترتیب ۴۵% > ۳۰% > ۱۵% بود. با افزایش رس،حدود و

۲۵.Upper plastic limit/Liquid limit
۲۶.Lower plastic limit/Plastic limit
۲۷.Shrinkage limit
۲۸.Atterberg consistency limits
۲۹.Plasticity index
۳۰. Friability index
۳۱.Shrinkage index
۳۲.Soil consistency indices

شاخص‌های پایداری افزایش معنی‌دار یافتند (جدول ۲). پالیگورسکیتبا ساختار رشته‌ای و سطح ویژه و فعالیت خیلی زیاد حدود و شاخص‌های پایداری بیش‌ترینسبت به بنتونیت با سطح ویژه و فعالیت زیاد داشت.

جدول ۱- تجزیه واریانس (MS) اثر نوع و درصد رس بر حدود و شاخص‌های پایداری

منابع تغییرات	درجه آزادی	حدود و شاخص‌های پایداری						
		PL	LL	SL	PI	SI	FI	A
نوع رس (s)	۱	۷۵/۸۴۵**	۶۷/۴۱۰۱**	۳۶/۵۰**	۳۷/۱۲۲۲**	۰۶/۳۲۴۳**	۳۶/۴۸۳**	۱۱/۱**
درصد رس (p)	۲	۱۸/۵۱۰**	۶۶/۳۹۸۷**	۸۸/۷۱**	۳۶/۱۶۶۸**	۴۶/۳۰۰۷**	۸۶/۲۱۷**	۳۲/۰**
s×p	۲	۹۴/۷۲**	۹۱/۴۸۹**	۰۰/۷**	۳۶/۱۹۵**	۷۸/۳۷۹**	۱۰/۳۶**	۰۷/۰**
خطای آزمایش	۱۲	۶۲/۱	۴۵/۳	۲۱/۰	۱۰/۲	۵۵/۲	۴۱/۱	۰۰/۰

**** بیان‌گر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱% است.**

مقادیر LLو PI بر روی چارت خمیرایی پیشنهادی توسط کاساگراند (طبقه‌بندی خاک متحد[۳۳]،USC) در شکل ۱ ارائه شده است. خط تجربی این چارت که با عنوان خط A شناخته می‌شود جداکننده خاک‌های غیرآلی رسی از خاک‌های آلی و سیلتی می‌باشد؛ بدین ترتیب که خاک‌هایی که در بالای این خط واقع می‌شوند در محدوده خاک‌های غیرآلی رسی و خاک‌های زیر این خط جزء خاک‌های آلی و سیلتی طبقه‌بندی می‌شوند. هم‌چنین از حد روانی برای جداسازی سه سطح تراکم‌پذیری (کم، متوسط و زیاد) استفاده می‌شود که به ترتیب، مربوط به سه گروه LL<۳۰، ۳۰-۵۰ و LL>۵۰ می‌باشند. خاک‌های با حد روانی کم‌تراز ۲۰% به عنوان خاک‌های غیرخمیری[۳۴] شناخته می‌شوند؛ بنابراین خاک‌های آلی هم در زیر و هم در بالای خط A می‌توانند قرار بگیرند.در LLثابت، مقادیر بیش‌تر PIبیان‌گر بیش‌تربودن رس، سفتی و مقاومت خشک خاک و هم‌چنین کم‌تربودن نفوذپذیری است.در PI مشخص، با افزایش LL تراکم‌پذیری نیز افزایش می‌یابد. PI و LL هر دو وابسته به مقدار و نوع رس موجود در خاک می‌باشند(Campbell, ۲۰۰۱).

جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر نوع و درصد رس بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری

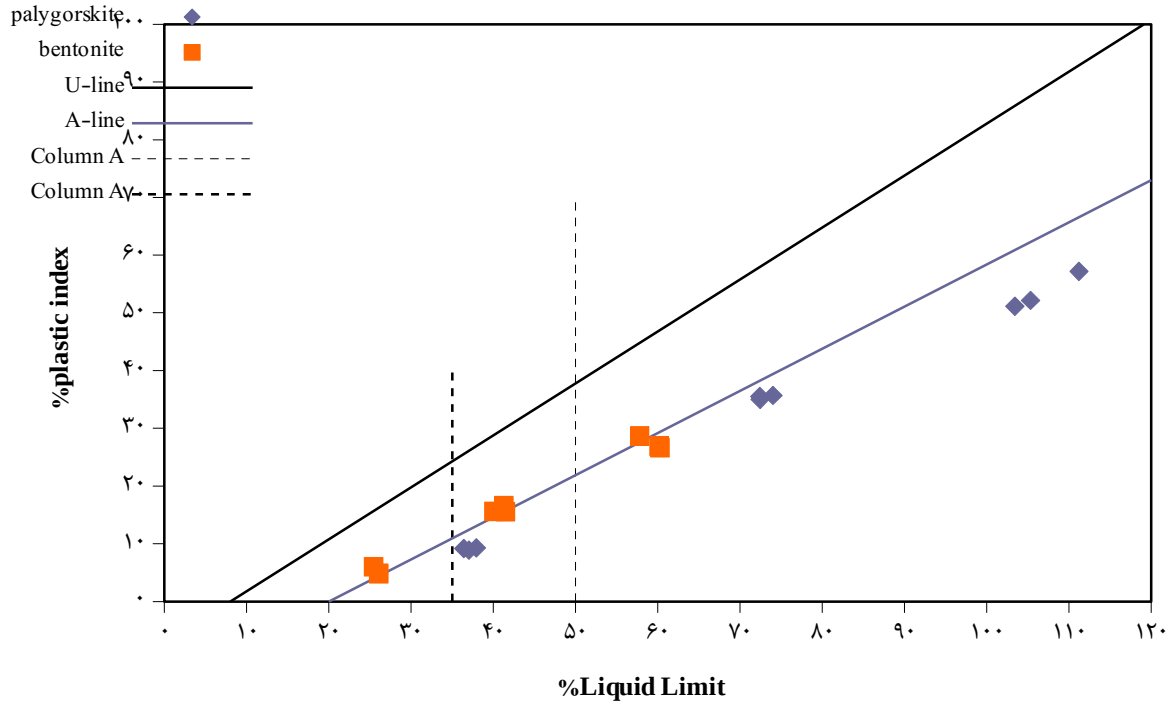
عوامل آزمایش	حدود و شاخص‌های پایداری (درصد وزنی)						
	SL	PL	LL	PI	SI	FI	A(-)
نوع رس							
پالیگورسکیت	a۰۵/۷	a۵۸/۳۹	a۲۶/۷۲	a۶۷/۳۲	a۲۱/۶۵	a۵۳/۳۲	a۹۹/۰
بنتونیت	b۷۰/۳	b۸۷/۲۵	b۰۶/۴۲	b۱۹/۱۶	b۳۶/۳۸	b۱۷/۲۲	b۵۰/۰
درصد رس							
۱۵%	c۶۱/۱	c۳۰/۲۴	c۴۸/۳۱	c۱۸/۷	c۸۷/۲۹	c۶۹/۲۲	b۴۸/۰
۳۰%	b۰۹/۶	b۳۰/۳۱	b۹۶/۵۶	b۶۶/۲۵	b۸۷/۵۰	b۲۱/۲۵	a۸۵/۰
۴۵%	a۴۲/۸	a۵۸/۴۲	a۰۴/۸۳	a۴۶/۴۰	a۶۲/۷۴	a۱۵/۳۴	a۹۰/۰

در هر ستون ودر هر گروه میانگین‌های با حروف متفاوت، از نظر آماری در سطح احتمال ۵% تفاوت معنی‌دار دارند (آزمون LSD).

اغلب خاک‌های دنیا زیر خط بالایی[۳۵](U-line) قرار می‌گیرند و تیمارهای آزمایشی نیز از این قاعده پیروی می‌کنند (شکل ۱). خاک‌های غنی از رس‌های آماس‌پذیر و ۲:۱(مونت‌موریلونیت) در بالای خط Aواقع می‌شوند؛ تیمارهای بنتونیتتقریباً روی خط A قرار گرفته‌اند که به دلیل اشباع‌شدن با Ca^{2+} و کاهش فعالیت آن می‌باشد. پالیگورسکیت حد روانی زیادی دارد اما به نسبت PIکم‌تری دارد و تیمارهای این کانی در زیر خط Aقرار دارند (شکل ۱). انتظار می‌رود تیمار ۱۵% بنتونیت با داشتن حد روانی کم‌تر از ۳۰% تراکم‌پذیری کمی داشته ولی تیمارهای ۳۰% بنتونیت و ۱۵% پالیگورسکیت در محدوده LL>۳۰%<۵۰% قرار دارند و طبق طبقه‌بندی کاساگراند در کلاس تراکم‌پذیری متوسط طبقه‌بندی می‌شوند. برای تیمارهای ۴۵% بنتونیت و ۳۰% و ۴۵% پالیگورسکیت تراکم‌پذیری زیاد تخمین زده می‌شود. تیمارهای ۴۵% بنتونیت و ۳۰% و ۴۵% پالیگورسکیت با داشتن LL بیش از ۵۰%دارای پتانسیل خمیرایی زیاد[۳۶](HP)و تیمارهای ۱۵% و ۳۰% بنتونیت، ۱۵% پالیگورسکیت دارای پتانسیل خمیرایی کم (LP) یا LL کم‌تر از ۵۰% هستند (شکل ۱).

شیب رابطه PI در برابر درصد رس بیان‌گر فعالیت خاک (A) می‌باشد که به ویژگی‌های کانی‌شناسی ذرات خاک بستگی داشته و تحت تأثیر نوع رس می‌باشد. فعالیت بیش‌تر، بیان‌گر تأثیر بیش‌تر ذرات رس بر ویژگی‌های خاک و حساسیت بیش‌تر ویژگی‌هایخاک به تغییر در فاکتورهایی مانند نوع کاتیون‌های تبادلی و ترکیب آب منفذی می‌باشد(Mitchell, ۱۹۹۳).در تیمارهای مورد بررسی فعالیت در دامنه ۳۲/۰ تا ۲۷/۱ متغیر بوده که بیش‌ترین آن مربوط به تیمار ۴۵% پالیگورسکیت و کم‌ترین آن مربوط به تیمار ۱۵% بنتونیت بوده است.

۳۳. Unified Soil Classification
۳۴. Non-plastic
۳۵. Upper (U) line
۳۶. High plasticity



شکل ۱ - پراکنش داده‌های شاخص خمیری در برابر حد روانی مربوط به مخلوط‌های شن-کانی مختلف روی چارت خمیرایی پیشنهادی کاساگراند (طبقه‌بندی خاک متحد یا USC)

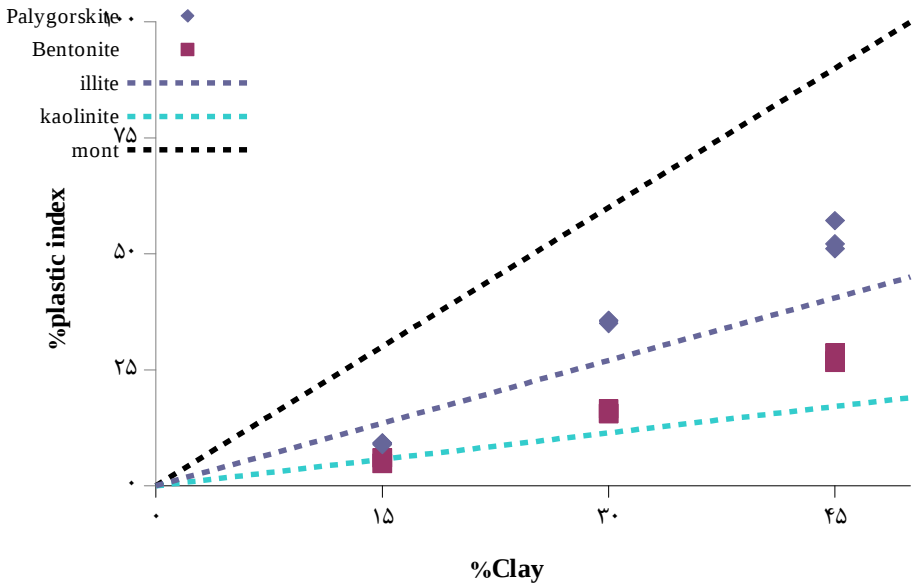
در شکل ۲ پراکنش داده‌های شاخص خمیرایی در برابر درصد رس در مقایسه با خطوط پیشنهادی توسط ویلیامز و دونالدسون ارائه شده است. فعالیت مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت به ترتیب برابر ۲/۷، ۹/۰ و ۳۸/۰ می‌باشند. اشباع‌شدن کانی‌ها با Ca^{+2} باعث کاهش فعالیت مخلوط کانی-شن شده است (شکل ۲). این نتایج بایافته‌های وایت (۱۹۵۵) هم‌خوانی دارد، که فعالیت مونت‌موریلونیت از ۲۴/۱ در حالت حضور منیزیم به عنوان کاتیون تبادلی تا ۰۹/۷ برای شرایط اشباع از سدیم متغیر بوده است (Mitchell, ۱۹۹۳).

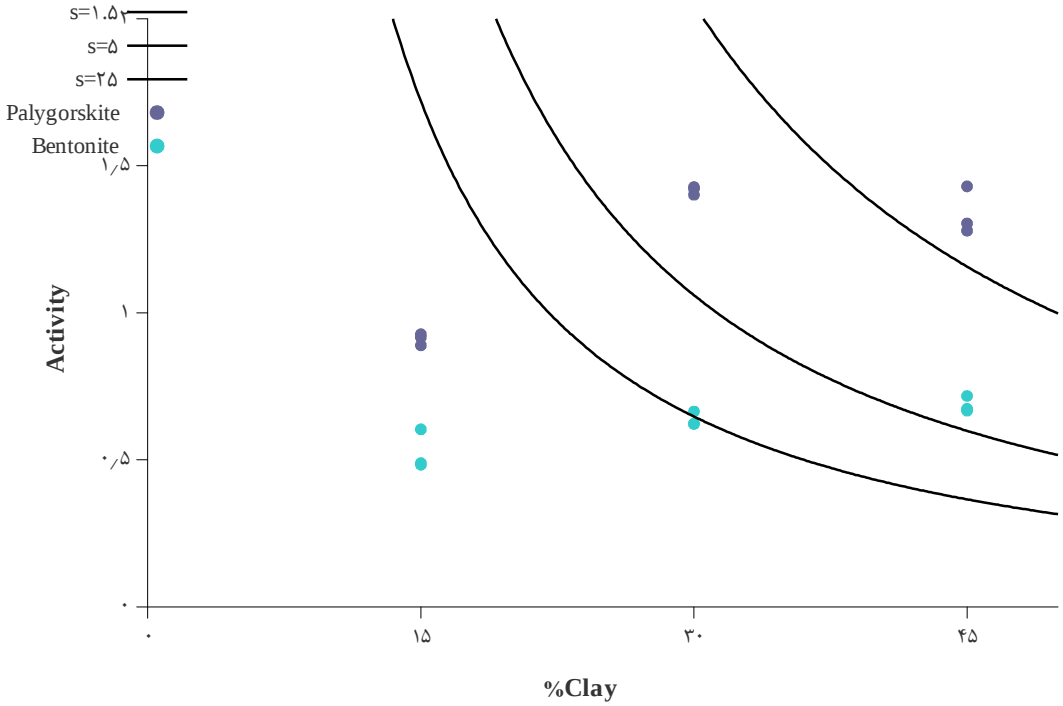
سید و همکاران (۱۹۶۲) با بررسی پتانسیل انبساط‌پذیری مخلوط‌های شن-رس توانستند هم‌بستگی قوی بین انبساط‌پذیری با مقدار رس و شاخص خمیری بدست آورده و روشی برای تخمین پتانسیل انبساط‌پذیری‌پیشنهاد دادند (معادله ۱). در این رابطه S پتانسیل انبساط‌پذیری، Clay درصد رس و A فعالیت رس است که با تعریف رایج کمی تفاوت داشته و برابر با PI/(Clay%−۵) است:

$$s = (3.6 \times 10^{-5})A^{2.44}Clay^{3.44}$$

در شکل ۳،خطوط سهموی برای مقادیر S برابر با ۵/۱، ۵ و ۲۵ درصد بر اساس معادله ۱ رسم شده و برای نقاطی که بالاتر از ۲۵= S قرار می‌گیرند پتانسیل انبساط‌پذیری خیلی زیاد پیش‌بینی می‌شود (۴۵% پالیگورسکیت)، تیمارهایی که در محدوده ۲۵>S>۵ قرار می‌گیرند دارای انبساط‌پذیری زیاد (۳۰% پالیگورسکیت و ۴۵% بنتونیت)، محدوده ۵>S>۵/۱ در گروه خاک‌های با انبساط‌پذیری میانه (۳۰% بنتونیت) و مقدار کم‌تر از ۵/۱ درصد دارای پتانسیل انبساط‌پذیری کم هستند (۱۵% و ۳۰% بنتونیت، ۱۵% پالیگورسکیت).

به طور کلی نتایج نشان داد بیش‌ترین تأثیر بر حدود آتربرگ و شاخص‌های پایداری مربوط به کانی پالیگورسکیت و سپس بنتونیت بوده و افزایش مقدار رس باعث افزایش مقادیر این حدودو شاخص‌ها گردید. بنابراین خاک‌های با رس‌های غالب پالیگورسکیت یا بنتونیت نیاز به مدیریت ویژه در رابطه با خاک‌ورزی و تردد ماشین‌های کشاورزی دارند.





شکل ۲ - پراکنش داده‌های شاخص خمیری در برابر درصد رس شکل ۳- توزیع مقادیر فعالیت در برابر درصد رس و گروه‌بندی بر اساس و مقایسه آن با خطوط معرفی‌شده توسط ویلیامزانبساط‌پذیری در تیمارهای مورد بررسی بر اساس معیار پیشنهادی و دونالدسونسید و همکاران(Seed et al, ۱۹۶۲)

منابع

بای‌بوردی، م.، ۱۳۸۸. فیزیک خاک، نشر دانشگاه تهران.

Brady, N. C. and R. R. Weil. ۱۹۹۸. The Nature and Properties of Soils. ۱۲thEdition, Prentice Hall, New York.
Brigatti, M. F., E. Galan, B. K. G. Theng and F. Babonneau. ۲۰۰۶. Structure and mineralogy of clay minerals. PP. ۱۹-۸۶. In: F. Bergaya, B.K.G Theng, and G. Lagaly (Eds.), Development in Clay Science. Elsevier.
Campbell, D. J. ۲۰۰۱. Liquid and plastic limits. PP. ۳۴۹-۳۷۵. In: K. A. Smith, and C. E. Mullins (Eds). Soil and Environmental Analysis, Physical Methods. Dekker Inc. New York.
Carter, M. R., and E. G. Gregorich. ۱۹۹۳. Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, ۲ndEdition, CRC Press.
Galan, E., A. Singer. ۲۰۱۱. Development in Clay Science. Volume ۳. Development in Palygorskite-Sepiolite Research. PP. ۴۷۶. Elsevier.
Keller, T., and A. R. Dexter. ۲۰۱۲. Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. Soil Res. ۵۰: ۷-۱۷.
Khademi H., and Mermut A.R. ۱۹۹۸. Submicroscopy and stable isotope geochemistry of carbonates and associated palygorskite in selected Iranian Aridisols. Soil Sci. Soc. Am. J. ۵۰: ۲۰۷-۲۱۶.
McBride, R. A. ۲۰۰۸. Soil consistency and lower plastic limits. PP: ۷۶۱-۷۶۷. In: M. R. Carter, E. G. Gregorich (Eds.). Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science, ۲ndEdition, CRC Press.
McGarry, D. ۲۰۰۲. Soil shrinkage. PP: ۲۴۰-۲۶۰. In: McKenzie N., K. Coughlanand H. Gresswell (Eds.), Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation. CSIRO Publishing.
Mitchell, J. K. ۱۹۹۳. Fundamentals of Soil Behavior. ۲nd ed. John Wiley and Sons. New York.
Murray, H. H. ۲۰۰۷. Applied Clay Mineralogy: Occurrence, Processing and Application of Kaolins, Bentonite, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. Elsevier, Amsterdam.
Ruiz-Hitzky, E. ۲۰۰۱. Molecular access to intracrystalline tunnels of sepiolite. J. Mater. Chem. ۱۱: ۸۶-۹۱.
Seed, H. B., R. J. Woodward, and R. Lundgren. ۱۹۶۲. Prediction of swelling potential for compacted clays. J.Soil Mech. Found. Div. ASCE. ۸۸: ۵۳-۸۷.

Abstract

Atterberg limits (liquid limit, LL; plastic limit, PL; shrinkage limit, SL) and consistency indices (plasticity index, PI; friability index, FI) are useful indicators of soil mechanical behavior and are used for soil management. These limits and indices greatly depend on amount and type of clay minerals. A simple and accurate approach to study the effects of specific clay mineralon soil properties and behavior is by preparing sand-clay mixtures. This study was conducted to investigate the effect of two types of Ca-saturated clay minerals(i.e. palygorskite, bentonite) in three rates (۱۵, ۳۰ and ۴۵%) on Atterberg limits and consistency indices of their sand-clay mixtures.The results showed that palygorskite had the highesteffect on the Atterberg limitsand consistency indices. The limits and indices increased with an increment in the clay content. The highest activity belonged to ۴۵% of palygorskite and its lowest value was observed for ۱۵% bentonite.