# تأثیر نوع و مقدار رس بر مقاومت برشی اشباع مخلوط‌های شن-رس

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

**چکیده**

در این پژوهش تأثیر چهار نوع کانی رسی پالیگورسکیت، بنتونیت، کائولینیت و فلوگوپیت اشباع از کاتیون تبادلی کلسیم در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵% بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی، c؛ زاویه اصطکاک داخلی، ) مخلوط‌های شن-کانی بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات c، با افزایش رس نامنظم بوده در حالی که تغییرات روند مشخص‌تری داشته و با افزایش رس، نیز کاهش یافت. کم‌ترین و بیش‌ترین c به ترتیب در تیمارهای ۳۰% کائولینیت (به دلیل ذرات درشت و اتصال ضعیف بین آنها) و ۳۰% پالیگورسکیت (به دلیل ساختار رشته‌ای) مشاهده شد. هم‌چنین کم‌ترین در تیمار ۴۵% بنتونیت (با ذرات ریز و انعطاف‌پذیر) و بیش‌ترین مقدارآن در تیمار ۱۵% پالیگورسکیت بدست آمد. در کل با افزایش درصد رس، تفاوت بین تیمارهای رسی مشخص‌تر شد به طوری که در تیمار ۱۵ درصد رس، تفاوت چندانی بین رس‌های مختلف نبود ولی با افزایش مقدار رس، کاهش یافته و این کاهش برای رس بنتونیت چشم‌گیر بود.

واژه‌های کلیدی: مقاومت برشی، پالیگورسکیت، بنتونیت، کائولینیت، فلوگوپیت

**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. کانی‌های معدنی 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 ساده‌تر بوده با این حال ممکن است رفتار و ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده برای کانی‌های خالص دقیقاً شبیه رفتار و ویژگی‌های خاک‌های 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 پارامترهای مقاومت برشی در رطوبت اشباع 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، فلوگوپیت و بنتونیت فراوانی زیادی در خاک‌های مناطق خشک ایران دارند و از رس‌های ۱:۱ کائولینیت در خاک‌های مناطق مرطوب ایران یافت می‌شود.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 شده است(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 (Birgatti et al, ۲۰۰۶). 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). میکاها بسته به کاتیون موجود در لایه اکتاهدرال به میکاهای دوجایی شامل مسکویت و گلوکونیت و میکاهای سه‌جایی شامل بیوتیت و فلوگوپیت گروه‌بندی می‌شوند.فلوگوپیت اغلب در سنگ‌های سرپانتینی به رنگ نقره‌ای تا قهوه‌ای روشن وجود دارد و حاصل دگرگونی سنگ آهک منیزیمی یا دولومیتی است (Sparks & Huang, ۱۹۸۵). در میکاهای سه‌جایی علاوه بر پتاسیم، آهن و منیزیم نیز وجود دارد (Deer &

Zussman, ۱۹۶۲). کائولینیت یکی از گسترده‌ترین کانی‌های رسی در خاک می‌باشد. پیوندهای هیدروژنی عامل اتصال لایه‌های مجاور به یکدیگر بوده و از انبساط این کانی در آب جلوگیری می‌نماید. گنجایش تبادل کاتیونی این کانی ۱۰-۱ میلی‌اکی‌والان بر صد گرم است (بای‌بوردی، ۱۳۸۸؛ Dixon, ۱۹۸۹) و سطح ویژه آن عمدتاً سطوح خارجی بوده و حدود ۲۰-۱۰ متر مربع بر گرم می‌باشد (Dixon, ۱۹۸۹).

**مقاومت برشی خاک**

توده خاک تا حد معینی در برابر نیروهای خارجی مقاومت نشان داده و پس از آن گسیخته می‌شود. گسیختگی خاک معمولاً از نوع برشی است و به حداکثر مقاومتی که خاک در برابر تنش‌های برشی (گسیختگی برشی و لغزش) از خود نشان می‌دهد مقاومت برشی[۱۲۳] گویند. مقاومت برشی خاک متشکل از دو بخش چسبندگی[۱۲۴]، c، و مقاومت اصطکاکی[۱۲۵] بین ذرات خاک است. چسبندگی مشخصه ذاتی خاک است و بستگی به میزان و نوع رس، درجه اشباع، نوع کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول و مقدار ماده آلی داشته و مستقل از نیروهای خارجی (تنش عمودی روی سطح گسیختگی) می‌باشد. با افزایش درصد رس و کاهش درجه اشباع، مقدار c افزایش می‌یابد. مقاومت اصطکاکی که متناسب با تنش عمودی وارده بر سطح لغزش بوده و با زاویه اصطکاک بین دانه‌های خاک موسوم به زاویه اصطکاک داخلی[۱۲۶]، ، ارزیابی می‌گردد و به دلیل قفل‌شدگی دانه‌ها در یکدیگر و اصطکاک بین آن‌ها بوده و بنابراین به شکل ذرات و درجه تراکم خاک بستگی دارد. مقاومت برشی خاک به صورت مجموع مقاومت حاصل از چسبندگی و مقاومت حاصل از اصطکاک بیان می‌گردد (Leonard & Richard,۲۰۰۴).

هاتیبو و هتیارتچی (۱۹۹۳) نشان دادند که رفتار گسیختگی خاک‌های کشاورزی به بافت و ساختمان بستگی داشته و با افزایش میزان رس رفتار خاک هنگام گسیختگی بیش‌تر به سمت انواع نرم و با افزایش میزان شن، گسیختگی به سمت انواع گسیختگی ترد میل خواهد کرد و حالت‌های بینابینی زیادی نیز وجود دارد که بسته به میزان رطوبت و ریزساختار خاک[۱۲۷] می‌تواند رخ دهد (Hatibu & Heittaratchi, ۱۹۹۳). لی و همکاران (۱۹۹۳) (Ley et al, ۱۹۹۳) دریافتند که مقدار رطوبت و پتانسیل ماتریک، مقاومت مکانیکی خاک را از راه کنترل تنش مؤثر[۱۲۸] تحت تاثیر قرار می‌دهند. میشل (۱۹۷۶) بیان کرد که مقاومت برشی شن‌ها تابعی از تنش موثر می‌باشد. رابطه تنش موثر (s) با مقدار رطوبت (درجه اشباع یا Sr) و مکش ماتریک (½Ym ½) خاک به صورت ساده‌ای است (=Sr½Ym½-s) که توسط مولینز و پانایوتوپولوس (۱۹۸٤) (Mulins & Panayiotopoulos, ۱۹۸۴) ارائه شده است. با کاهش مقدار رطوبت، مکش ماتریک خاک افزایش می‌یابد که موجب افزایش تنش موثر و مقاومت برشی خاک می‌شود (Mitchell, ۱۹۹۳).

## مواد و روش‌ها

**آماده‌سازی کانی‌های مورداستفاده**

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 خریداری شد. کانی بنتونیت از شرکت توما اصفهان، فلوگوپیت از شرکت آذر طلق تهران و کائولینیت از معادن واقع در استان یزد تهیه شد. کانی‌های رسی از الک ۰۵۳/۰ میلی‌متر عبور داده شدند. با افزودن محلول ۵/۰ مولار CaCl۲ به وسیله یون Ca۲+ 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 شو داده شد. در نهایت کانی‌های رسی در سه سطح ۱۵، ۳۰ و ۴۵% با شن (کوارتز) مخلوط شدند.

**آزمایش برش مستقیم**

آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTMD-۳۰۸۰انجام شده است. برای ساخت نمونه‌ها، از درجه تراکم نسبی برابر استفاده شد تا امکان مقایسه تیمارهای مختلف فراهم شود. چگالی ظاهری معیار (BDref) با استفاده از معادله جونز (۱۹۸۳) و دکستر (۲۰۰۴) (Dexter, ۲۰۰۴) (معادله ۱) محاسبه شد و سپس BDref۹۰% به عنوان معیار برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد. میزان کوارتز و رس مورد نیاز با توجه به حجم قالب و تیمارهای مورد نظر محاسبه شد. شن و رس در حالت مرطوب با یکدیگر مخلوط شده، در قالب مربوطه متراکم گردیده و سپس به قالب اصلی دستگاه برش مستقیم انتقال یافتند:

$$BD_{ref}(g/cm^3) = 1.882 - 0.0083\%Clay$$

هر نمونه شن-کانی رسی در قالب فلزی دستگاه برش مستقیم به مدت ۱۲-۲۴ ساعت (بسته به مقدار رس) اشباع شده و سپس با نرخ جابه‌جایی برابر ۰۶/۱ میلی‌متر بر دقیقه و تحت تنش‌های عمودی برابر ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به صورت زهکشی شده و

---

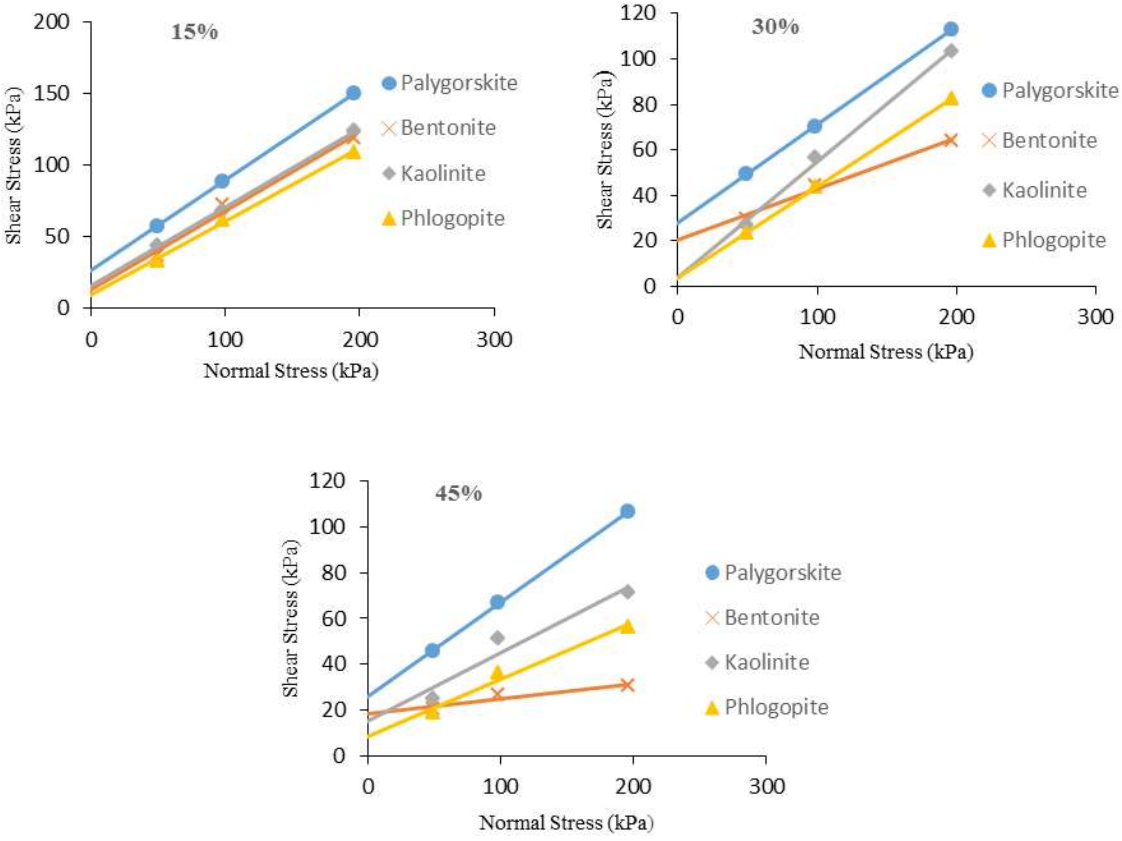
۱۲۳. Shear strength
۱۲۴. Cohesion
۱۲۵. Frictional strength
۱۲۶. Angle of internal friction
۱۲۷. Soil microstructure
۱۲۸. Effective stress

تا رسیدن به تغییر مکان ۱۵% یا نقطه اوج مقاومت گسیخته شدند. سپس پوش خطی گسیختگی مور-کولمب با ترسیم داده‌های مقاومت برشی در برابر تنش عمودی به دست آمد و چسبندگی (c) به عنوان عرض از مبدا و زاویه پوش گسیختگی به عنوان زاویه اصطکاک داخلی ( ) محاسبه شد.

تجزیه‌های آماری اثر مقدار و نوع کانی رسی بر پارامترهای مقاومت برشی (c و ) در دو تکرار و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار SAS ۹.۰ انجام گرفت. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excelاستفاده شد.

**نتایج و بحث**

پوش گسیختگی مور-کولمب برای مخلوط‌های مختلف شن-رس در شکل ۱ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش درصد رس، تفاوت ضرایب زاویه اصطکاک داخلی بین تیمارهای رسی مشخص‌تر شده است. به عبارت دیگر در تیمار ۱۵ درصد رس، تفاوت چندانی بین رس‌های مختلف نیست ولی با افزایش مقدار رس، شیب پوش گسیختگی کاهش یافته و این کاهش برای رس بنتونیت چشم‌گیر است. دیده می‌شود در تمام سطوح رس، مخلوط پالیگورسکیت-شن بیش‌ترین چسبندگی را دارد. تغییرات چسبندگی با افزایش رس برای هر کانی نامنظم بوده در حالی که این تغییرات برای زاویه اصطکاک داخلی نظم بیش‌تری داشته و با افزایش رس در سه سطح کانی‌های مختلف، شیب (و زاویه اصطکاک داخلی) پوش گسیختگی کاهش یافت. به طور کلی می‌توان گفت زاویه اصطکاک داخلی برای ترکیب پالیگورسکیت-شن بیش‌ترین مقدار و سپس به ترتیب کائولینیت، فلوگوپیت و بنتونیت کاهش یافت.




**شکل ۱- پوش گسیختگی مور-کولمب برای مخلوط‌های مختلف شن-رس مورد بررسی**

اثر نوع رس و درصد رس و اثر متقابل آن‌ها بر پارامترهای مقاومت برشی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). پالیگورسکیت بیش‌ترین میانگین چسبندگی را داشته و سپس میانگین این پارامتر به ترتیب در تیمارهای بنتونیت، کائولینیت و فلوگوپیت روند کاهشی داشت. با افزایش رس از ۱۵% به ۳۰% مقدار چسبندگی به مقدار ۱۶/۱۶% و به طور معنی‌داری کاهش یافت. با افزایش درصد رس از ۳۰% به ۴۵%، مقدار چسبندگی ۸۲/۲۱% افزایش معنی‌دار یافت. افزایش چسبندگی در نتیجه افزایش رس از سطح ۱۵% به ۴۵% معنی‌دار نبود. میانگین زاویه اصطکاک داخلی در تیمارهای مورد بررسی به ترتیب کانی پالیگورسکیت > کائولینیت > فلوگوپیت > بنتونیت دیده شد. با افزایش رس از ۱۵% به ۳۰% و از ۳۰% به ۴۵%، میانگین زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۴۶/۲۶% و ۶۶/۳۵% کاهش معنی‌دار یافت (جدول ۲). نتایج حاصله با یافته‌های شانیوگ و تیواری و موری در بررسی تأثیر افزایش میزان رس در خاک‌های شنی بر پارامترهای مقاومت برشی هم‌خوانی دارد؛ این دانشمندان گزارش کردند مقدار چسبندگی با افزایش درصد رس افزایش یافت (Shanyoug et al, ۲۰۰۷) در حالی‌که با افزایش رس مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد (Tiwari & Marui, ۲۰۰۵).

بررسی اثرات متقابل نوع و درصد رس بر چسبندگی، حاکی از روند تغییرات نامنظم این پارامتر به‌ازای افزایش درصد رس می‌باشد و بیش‌ترین چسبندگی در تیمار ۳۰% پالیگورسکیت و کم‌ترین مقدار آن در تیمار ۳۰% کائولینیت دیده شد. بنابراین نتیجه بدست‌آمده نیازمند بررسی بیش‌تر می‌باشد. در شکل ۲ اثر متقابل نوع و درصد رس بر زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد روند کاهشی به ازای افزایش میزان رس برای رس‌های مختلف متفاوت است. بیش‌ترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی در سطح ۱۵% پالیگورسکیت به دلیل ساختار رشته‌ای و درگیرشدن این رشته‌ها در ایجاد مقاومت اصطکاکی (لغزشی) و فراوانی ذرات شن در این تیمار مشاهده شد و کم‌ترین مقدار آن در ۴۵% بنتونیت به دلیل ذرات ریز، انعطاف‌پذیر و منظم این رس و مقدار کم شن بدست آمد.

**جدول ۱- تجزیه واریانس (MS) اثر نوع و درصد رس بر پارامترهای مقاومت برشی اشباع**

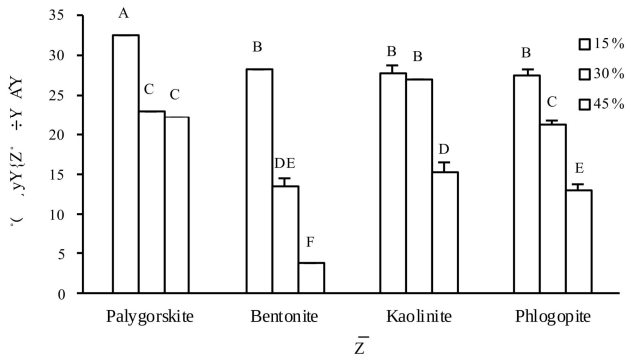
| منابع تغییرات | درجه آزادی | پارامترهای مقاومت برشی | |
|---|---|---|---|
| | | چسبندگی | زاویه اصطکاک داخلی |
| نوع رس(s) | ۳ | ۱۶/۴۱۶** | ۲۶/۱۲۵** |
| درصد رس(p) | ۲ | ۵۰/۲۱** | ۵۷/۴۶۸** |
| s×p | ۶ | ۱۳/۳۵** | ۳۷/۳۲** |
| خطای آزمایش | ۱۲ | ۸۹/۰ | ۸۵/۰ |

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

**جدول ۲- مقایسه میانگین تأثیر نوع و درصد رس بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) در حالت اشباع**

| عوامل آزمایش | پارامترهای مقاومت برشی | |
|---|---|---|
| | چسبندگی (kPa) | زاویه اصطکاک داخلی (°) |
| نوع رس | | |
| پالیگورسکیت | [a]۴۷/۲۶ | [a]۰۰/۲۶ |
| بنتونیت | [b]۲۲/۱۷ | [d]۳۴/۱۵ |
| کائولینیت | [c]۷۳/۱۱ | [b]۴۷/۲۳ |
| فلوگوپیت | [d]۱۰/۷ | [c]۷۶/۲۰ |
| درصد رس | | |
| ۱۵% | [a]۴۰/۱۶ | [a]۰۶/۲۹ |
| ۳۰% | [b]۷۵/۱۳ | [b]۳۷/۲۱ |
| ۴۵% | [a]۷۵/۱۶ | [c]۷۵/۱۳ |

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




**شکل ۲- اثر متقابل نوع و درصد رس بر میانگین مقدار زاویه اصطکاک داخلی**

به طور کلی پالیگورسکیت به دلیل ساختار رشته‌ای و درگیرشدن این رشته‌ها در ایجاد مقاومت‌های چسبندگی و اصطکاکی، بیش‌ترین مقادیر پارامترهای مقاومت برشی را داشت. رس کائولینیت به دلیل ذرات درشت و اتصال ضعیف بین آنها کم‌ترین چسبندگی را بروز داد. ذرات ریز و انعطاف‌پذیر رس بنتونیت دلیلی بر زاویه اصطکاک داخلی کم آن می‌باشد.

## منابع


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

Brady, N. C. and R. R. Weil. ۱۹۹۸. The Nature and Properties of Soils. ۱۲th Edition, 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.

Deer, W. A. and J. Zussman, ۱۹۶۲. Rock-Forming Minerals. Longman, London. ۹۳۲ P.

Dexter, A. R. ۲۰۰۴. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth land and hardsetting. Geoderma. ۱۲۰: ۲۱۵-۲۲۵.

Dixon, J. B. ۱۹۸۹. Kaolin and serpentine group minerals, In: J. B. Dixon and S. B. Weed; Minerals in Soil Environments. Soil Sci. Soc. Am. Madison Wisconsin, USA. PP: ۴۶۷-۵۱۹.

Galan, E., A. Singer. ۲۰۱۱. Development in Clay Science. Volume ۳. Development in Palygorskite-Sepiolite Research. PP. ۴۷۶. Elsevier.
Hatibu, N. and D. R. P. Hettiaratchi. ۱۹۹۳. The transition from ductile flow to brittle failure in unsaturated soils. J. Agric. Eng. Res. ۵۴: ۳۱۹-۳۲۸.
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.
Leonard, J. and G. Richard. ۲۰۰۴. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. Catena. ۵۷: ۲۳۳-۲۴۹.
Ley, G.J., C.A. Mullins and R. Lal. ۱۹۹۳. Effects of soil properties on the strength of weakly structured tropical soils. Soil Till. Res.۲۸: ۱-۱۳.
Mitchell, J. K. ۱۹۹۳. Fundamentals of Soil Behavior. ۲nd ed. John Wiley and Sons. New York.
Mullins, C.E. and K.P. Panayiotopoulos. ۱۹۸۴. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. J. Soil Sci. ۳۵: ۴۵۹-۴۶۸.
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.
Shanyoug, W and D. Chan. ۲۰۰۹. Experimental study of the fines content on dynamic compaction grouting in completely decomposed granite of Hong Kong. Construction and Building Materials ۲۳: ۱۲۴۹-۱۲۶۴.
Sparks, D. L. and P. M. Huang. ۱۹۸۵. Physical chemistry of soil potassium. PP. ۲۰۱-۲۷۶. In: R. D. Munson (Ed.), Potassium in Agriculture. ASA-CSSA-SSSA Madison, WI.
Tiwari, B and H. Marui. ۲۰۰۵. A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. Geothech. Geoenviron. Eng. J. ۱۳۱: ۱۱۳۹-۱۱۵۰.

**Abstract**

This study was conducted to investigate the effect of four types of Ca-saturated clay minerals (i.e. palygorskite, bentonite , kaolinite and phlogopite) in three rates (۱۵, ۳۰ and ۴۵%) on shear strength parameters (cohesion, c; angle of internal friction, ) of their sand-clay mixtures. The results showed that the decreased with an increment in the clay content while the c did not follow a specific trend with clay percent. The lowest and highest values of c belonged to ۳۰% of kaolinite (due to larger particles and in-between weak bonds) and palygorskite (due to filamentous structure), respectively. Furthermore, the lowest was observed for ۴۵% bentonite (with flexible fine particles) and its highest value was recorded for ۱۵% palygorskite. Overall, the differences among the treatments became more evident with an increase in the clay content; for the clay content of ۱۵% there was no considerable difference between the clay types but with an increment in the clay content, the would decrease especially for the bentonite.