

بررسی و مقایسه ویژگی‌های مقاومتی خاک‌های ماسه‌ای با تغییر درصد رطوبت و مشخصات بخش ریزدانه

مرضیه یوسفعلی^۱، مهدی خداپرست^{۲*}، فاطمه وحیدی نیا^۳

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۲۱

دریافت مقاله: ۹۹/۰۴/۰۲

چکیده

در طبیعت، خاک ماسه‌ای به ندرت به شکل تمیز و خالص می‌باشد و اغلب دارای مقادیر مختلفی ریزدانه است. انتظار می‌رود که حضور ریزدانه در خاک ماسه‌ای عملکرد مقاومت برشی و اتساعی خاک ماسه را تحت تأثیر قرار دهد؛ لذا در تحقیق حاضر با یک ایده جدید در ساخت نمونه‌ها، رفتار مقاومتی و اتساعی مخلوط ماسه ترکیب شده با ریزدانه با استفاده از دستگاه برش مستقیم کوچک مقیاس با دو نوع ریزدانه سیلت و رس و در چهار درصد ریزدانه متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ و در سه تراکم نسبی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد و با دو درصد رطوبت بهینه و اشباع، آماده و تحت تنشهای قائم ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مقدار ریزدانه منجر به کاهش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای می‌گردد و ریزدانه رسی مقاومت برشی خاک ماسه را بیشتر کاهش می‌دهد. همچنین افزایش درصد ریزدانه چه از نوع سیلت و چه از نوع رس سبب کاهش اتساع و زاویه اتساع و همچنین زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای می‌گردد؛ البته رس نسبت به سیلت پارامترهای مذکور را بیشتر کاهش داده است. پارامتر چسبندگی نیز با افزایش ریزدانه افزایش می‌یابد و البته در مخلوط رسی پارامتر چسبندگی با افزایش رس، بیشتر افزایش یافته است. همچنین نرخ تغییرات پارامتر چسبندگی با افزایش درصد ریزدانه افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: آزمایش برش مستقیم، ریزدانه‌های رسی و سیلتی، مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی، اتساع.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه قم، قم

۲. عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه قم، قم khodaparast@qom.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه قم، قم

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

معمولاً ماسه طبیعی کاملاً تمیز نبوده و شامل مقادیر قابل توجهی ریزدانه از نوع سیلت یا رس می‌باشد و ریزدانه‌ها بر خواص مهندسی خاک ماسه‌ای تأثیر قابل توجهی دارند. برآورد رفتار این خاک‌ها نیاز به شناسایی عوامل تأثیرگذار و بررسی تأثیر هرکدام از آنها بر رفتار خاک می‌باشد. عوامل متعددی از جمله دانه‌بندی و ساختار خاک، درصد رطوبت، نسبت بیش تحکیمی، شکل و اندازه دانه‌ها، نوع آزمایش، شرایط آزمایش، نسبت تخلخل، سطح تنش، چگالی نسبی و پارامترهای دیگر بر رفتار خاک تأثیرگذار هستند و حضور ریزدانه پارامترهای مذکور را تغییر داده و موجب تغییراتی در پاسخ‌های مقاومتی این خاک‌ها در مقایسه با ماسه تمیز می‌شود. مطالعات زیادی درباره‌ی رفتار مقاومتی ماسه‌ی تمیز انجام شده است و مطالعات انجام شده محققین را به شناخت کاملی از رفتار ماسه تمیز رسانده است. در حالیکه اکثر خاک‌های موجود در طبیعت، دارای ریزدانه هستند که رفتار متفاوتی نسبت به ماسه تمیز نشان می‌دهند. آزمایش‌های متعدد نشان داده است که افزودن ریزدانه به خاک دانه‌ای سبب کاهش مقاومت برشی و نسبت تخلخل کلی خاک می‌شود اما این کاهش مقاومت تا حد مشخصی از مقدار ریزدانه قابل مشاهده است و بعد از آن با افزایش ریزدانه، مقاومت خاک افزایش می‌یابد، مقدار ریزدانه‌ای که به ازای آن رفتار خاک تغییر کرده است را «مقدار ریزدانه انتقالی» می‌نامند.

بطور کلی مقدار ریزدانه انتقالی، مقدار ریزدانه‌ای است که در مقادیر کمتر از آن رفتار خاک توسط قسمت درشت‌دانه خاک و در مقادیر بزرگتر از آن، رفتار خاک توسط قسمت ریزدانه خاک کنترل می‌گردد (Thevanayagam et al., 2000, Thevanayagam, 2000, Mitchell and Soga, 2005, Kenny, 1977).

در مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، در عمده‌ی خاک‌های ماسه‌ای مقدار سیلت انتقالی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد (Kuerbis et al., 1988, Koester, 1994, Vaid, 1994, Singh, 1996, Salgado et al., 2000, Yang et al., 2006, Porcino and

(Diano, 2017) و بعضی از محققین بین ۲۰ تا ۴۵ درصد (Thevanayagam et al., 2002, Polito, 1999) گزارش داده‌اند و مقدار رس انتقالی نیز در خاک ماسه‌ای عمدتاً بین ۲۰ تا ۲۵ درصد (Skempton, 1985, Vallejo and Mawby, 2000, Noda and Hyodo, 2013) و مواردی زیر ۲۰٪ گزارش شده است (Georgiannou, 1991). لازم به ذکر است که منابع مورد اشاره توصیف ترکیب ماسه مورد آزمایش در تحقیقات خود را بیان نموده‌اند و در طبیعت ترکیب هر درصدی از مصالح محتمل است.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر رفتار خاک‌هایی که ترکیبی از دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه هستند، نوع ریزدانه می‌باشد. اکثر مطالعات انجام شده بر مخلوط ماسه - سیلت، در زمینه روانگرایی (تغییر شکل‌های بزرگ در خاک ضمن از دست دادن مقاومت و پایداری خاک بدون اعمال تنش) می‌باشد. پولیتو و مارتین (Polito and Martin, 2001) اثر میزان سیلت بر رفتار مقاومتی ماسه و تأثیر پارامترهای کنترل‌کننده‌ی روانگرایی مثل نسبت تخلخل را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است زمانی که نسبت تخلخل ثابت است، با افزایش درصد سیلت تا مقدار ۳۵ درصد، مقاومت روانگرایی کاهش می‌یابد، بعد از آن با افزایش سیلت، مقاومت روانگرایی افزایش می‌یابد.

عمده مطالعات انجام گرفته بر روی خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار نشان‌دهنده کاهش مقاومت برشی با افزایش درصد رس هستند

(Novais-Ferreira, 1971). نی و همکاران (Ni et al., 2004) بیان کردند که رس‌ها هیچ تأثیر مثبتی بر خواص مقاومتی خاک ندارند و با افزایش ریزدانه رسی، مقاومت برشی مخلوط کاهش می‌یابد و در بهترین حالت، چنانچه مخلوط خاک بیش تحکیم یافته باشد، رس فقط به عنوان پرکننده فضاهای خالی بین ذرات خاک اصلی عمل کرده و تأثیری بر مقاومت خاک نخواهند داشت. در واقع در این شرایط، افزودن ریزدانه نقش پرکننده فضاهای خالی را بدون مشارکت در مقاومت برشی ایفا نموده است.

مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای حاوی ریزدانه، یکی از مسائل مهم در طراحی‌های ژئوتکنیکی می‌باشد و با توجه به اینکه رفتار مصالح، تابعی از متغیرهای متعددی است که نمی‌توان از هیچ یک از آنها صرف نظر کرد، بنابراین انجام آزمایش‌های مکانیکی در شرایط متفاوت، ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، تأثیر ریزدانه و نوع ریزدانه بر خاک ماسه‌ای با استفاده از دستگاه برش مستقیم کوچک مقیاس در شرایط مختلف بررسی شده است و مقاومت برشی مخلوط‌ها و پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی و زاویه اتساع در تراکم نسبی‌های متفاوت و تحت سربار متفاوت و همچنین با دو درصد رطوبت بهینه و اشباع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

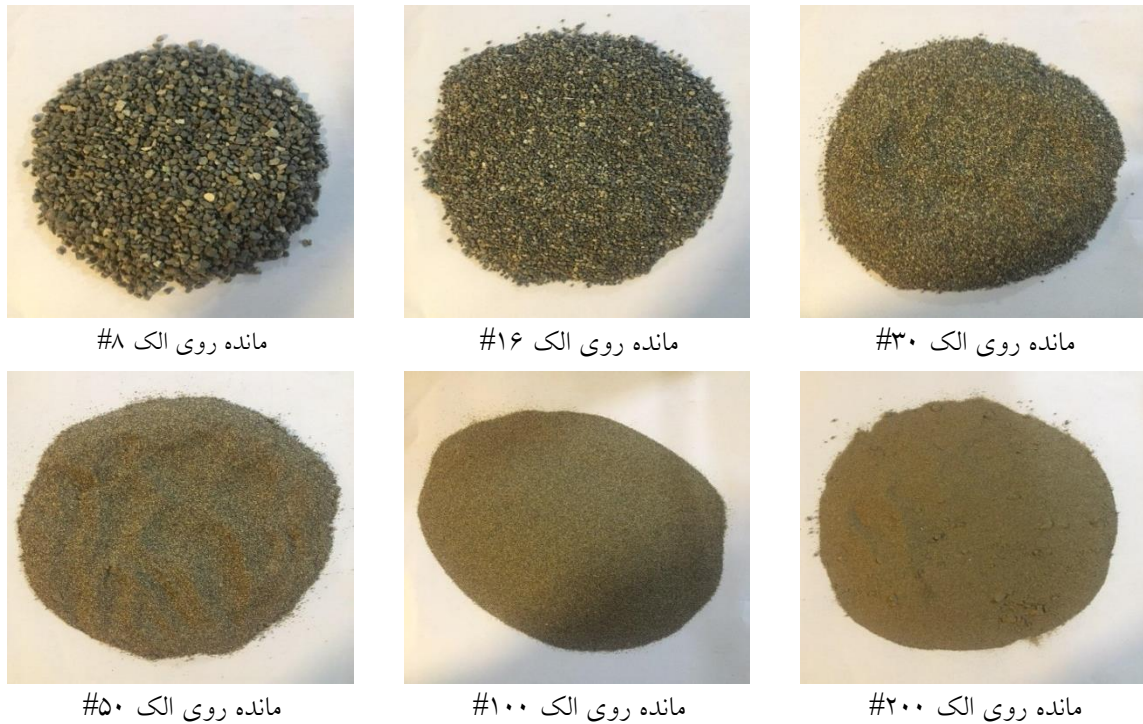
مصالح مورد استفاده در این تحقیق مخلوطی دوگانه از دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه می‌باشد. بخش درشت‌دانه شامل ماسه و بخش ریزدانه شامل سیلت و رس می‌باشد. در ابتدا مصالح از محل قرضه واقع در شهر قم به آزمایشگاه منتقل گشته و طبق استاندارد ASTM D-422 با استفاده از شش الک با شماره‌های ۸، ۱۶، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ تفکیک و شسته شده تا ماسه تمیز بدست آید. در شکل ۱ دانه‌های ماسه به تفکیک الک نشان داده شده است. حدود روانی و خمیری و همچنین شاخص خمیری خاک رس اضافه شده نیز به ترتیب برابر ۳۲، ۲۰ و ۱۲ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که تفکیک رس و سیلت در این تحقیق بر اساس حدود اتربرگ صورت گرفته و نوع کانی رس کائولینیت می‌باشد. در این تحقیق نمونه‌های خاک با چهار درصد ریزدانه متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ با دو نوع ریزدانه سیلت و رس در سه تراکم نسبی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد تحت سربارهای قائم ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ساخته شده‌اند. لازم به ذکر است که در یک ایده جدید در تهیه نمونه‌ها سعی شده است که نمودار دانه‌بندی انتخاب شده، نماینده‌ای از تمام نمودارهای ماسه خوب دانه‌بندی شده با درصد ریزدانه یکسان باشد. برای

مونکول و اوزدن (Monkul and Ozden, 2007) تأثیر افزایش ریزدانه رس بر ماسه را با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی کردند. مشاهدات آنها نشان داد که مقاومت برشی مخلوط تا مقدار ریزدانه انتقالی که در حدود ۱۹ تا ۳۴ درصد می‌باشد، کاهش یافته و با افزودن بیشتر ریزدانه فراتر از حد انتقال، افزایش می‌یابد. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار و مؤثر در رفتار خاک‌ها، درصد رطوبت است. درصد رطوبت و میزان آن در خاک‌های متفاوت تأثیر متفاوتی بر خواص مقاومتی خاک دارد. حضور آب در خاک‌ها سبب ایجاد مکش و فشار آب حفره‌ای می‌شود و این دو پارامتری مهم در توصیف رفتار خاک‌ها می‌باشند (Ng and Menzies, 2014). زهینگ و همکاران (Zhiqing et al, 2007) بیان داشتند تنش مؤثر یا مقاومت برشی در خاک‌های غیراشباع، در ارتباط مستقیم با مقدار مکش خاک است بنابراین، تغییر در میزان مکش خاک می‌تواند سبب تغییر در تنش برشی خاک در حالت غیراشباع شود. ون گنوجتین (Van Genuchten, 1980) مکش در خاک سیلت، رس و ماسه را با هم مقایسه کرد. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که در درصد رطوبت یکسان، مکش ماتریکس خاک رس بزرگتر از خاک سیلت، و مکش ماتریکس خاک سیلت بیشتر از خاک ماسه است. علت این امر به نوع ذرات بر می‌گردد. توضیح بیشتر آنکه ذرات رس، سطح ویژه بزرگتری داشته و دارای خاصیت خمیری می‌باشند، لذا جذب آب بیشتری دارند (Van Genuchten, 1980).

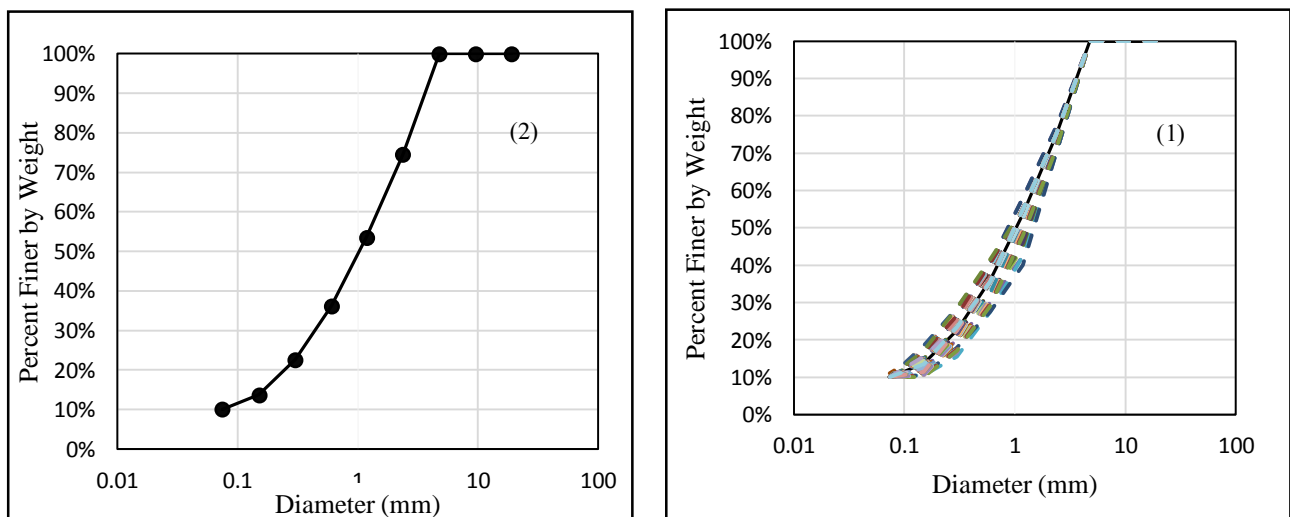
تیان و لی (Thian and Lee, 2011) با استفاده از آزمایش سه محوری زهکشی نشده، تحقیقاتی را بر روی ماسه ترکیب شده با سیلت و رس از نوع کائولینیت با درصد‌های مختلف انجام دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که افزایش مقادیر ریزدانه، رسی و یا سیلتی، منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی و افزایش چسبندگی می‌گردد با این تفاوت که زاویه اصطکاک داخلی نمونه ترکیب شده با سیلت بالاتر از ماسه رس‌دار و چسبندگی ماسه رس‌دار از ماسه سیلت‌دار بالاتر بدست آمد.

نمودار دانه‌بندی مربوطه به نمونه ماسه خوب دانه بندی شده با ۱۰ درصد ریزدانه را نشان می‌دهد و خصوصیات فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است.

این منظور، نمودار نماینده، میانگینی از تعداد زیادی نمودار دانه‌بندی متفاوت انتخاب گردید. لذا شاید بتوان گفت که نمونه خاک ساخته شده نماینده‌ای از رفتار تمام خاک‌های موجود در محدوده‌ی آن دانه‌بندی است. شکل ۲ نمونه‌ای از



شکل ۱. تصاویر دانه های ماسه شسته شده به تفکیک الک



شکل ۲. (۱): مجموعه نمودارهای دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای خوب دانه‌بندی شده با ۱۰ درصد ریزدانه (۲): نمودار دانه‌بندی میانگین خاک ماسه خوب دانه‌بندی شده با ۱۰ درصد ریزدانه

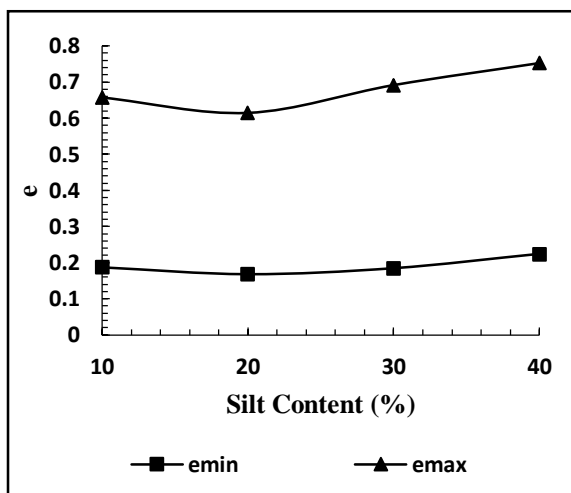
جدول ۱. مشخصات فیزیکی نمونه ماسه خوب دانه‌بندی شده با ۱۰ درصد ریزدانه با توجه به شکل ۲

Soil Type	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_c	C_u
SW	0.08	0.46	1.55	1.86	20.56

است. طبق مطالعات (Lade et al., 1998)، همانطور که از شکل‌ها مشخص است، درصد ریزدانه حدود ۲۰ درصد را می‌توان به عنوان حدس اولیه‌ای برای مقدار ریزدانه انتقالی که موجب افزایش نسبت تخلخل کلی خاک می‌شود، در نظر گرفت.

۳-۲. آزمایش برش مستقیم

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی و زاویه اتساع خاک در این مطالعه، از دستگاه برش مستقیم کوچک مقیاس استفاده شده است. قالب مورد استفاده به ابعاد $10 \times 10 \times 3$ سانتیمتر می‌باشد.



شکل ۴. مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل برای

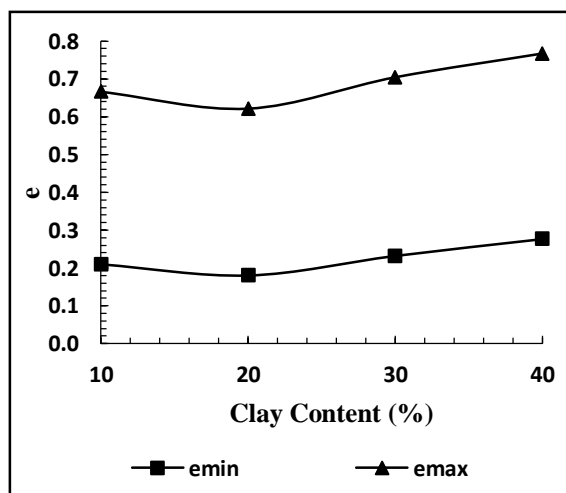
نمونه‌های با ریزدانه سیلتی

لازم به ذکر است که دانه‌های ماسه از تیزگوشه بوده و با توجه به محل منبع قرضه مربوط به سازند زمین‌شناسی قم هستند. سازند قم از سازندهای زمین‌شناسی ایران با سن الیگوسن - میوسن در ایران مرکزی است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تعیین نسبت تخلخل حداقل و حداکثر مخلوط

در این تحقیق نسبت تخلخل حداقل و حداکثر هر نمونه به ترتیب با استانداردهای ASTM D-4254 و ASTM D-4253 تعیین شده است. بر این اساس در شکل ۳ و شکل ۴ نمودار درصد ریزدانه در برابر نسبت تخلخل حداقل و حداکثر به ترتیب برای ماسه ترکیب شده با رس و سیلت نشان داده شده



شکل ۳. مقادیر نسبت تخلخل حداکثر و حداقل برای

نمونه‌های با ریزدانه رسی

مقادیر حداکثر تنش برشی به ازای سه سربار مختلف به دست آمده است. تغییرات مورد بررسی به شرح زیر می‌باشند.

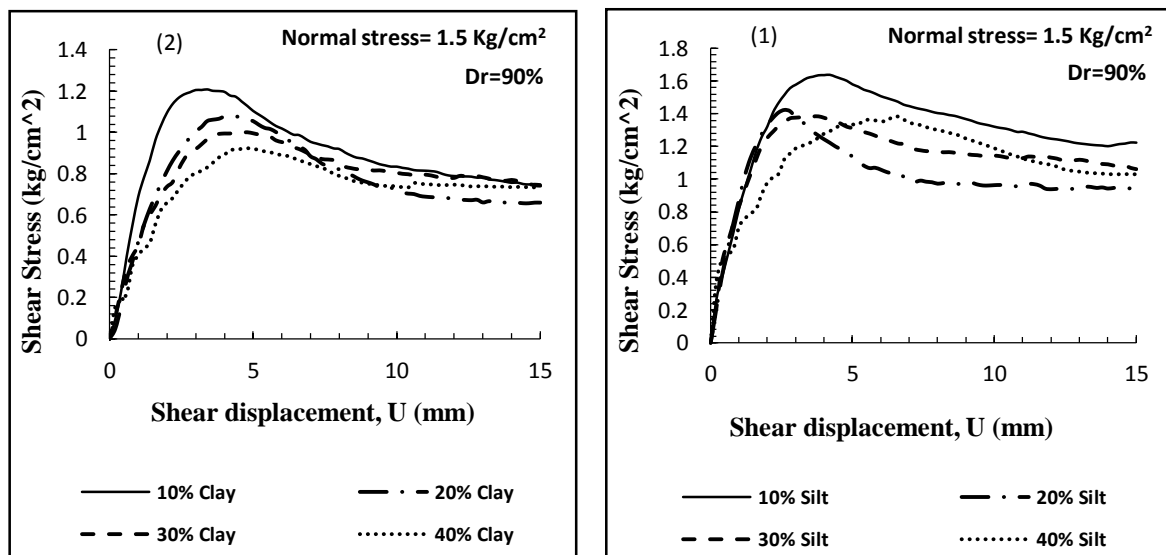
۳-۲-۱- تحلیل نتایج آزمایش

شکل ۵ تغییرات تنش برشی با تغییر شکل برشی، در درصد‌های مختلف سیلت و رس را برای تراکم نسبی ۹۰ درصد و در سربار قائم ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو نوع مخلوط با افزایش درصد ریزدانه مقاومت برشی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در هر دو مخلوط ماسه سیلت‌دار و ماسه رس‌دار بیشترین مقاومت به ازای ۱۰ درصد سیلت حاصل شده است. البته در مخلوط ماسه سیلت‌دار با افزایش درصد سیلت کاهش مقاومت کمتر شده و فقط نقطه پیک به ازای تغییر مکان‌های متفاوتی بدست آمده است. اما در مخلوط ماسه رس‌دار، با افزایش درصد رس کاهش بیشتری در مقاومت رخ می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر نوع ریزدانه، مقادیر حداکثر تنش برشی در برابر درصد ریزدانه سیلت و رس در سه تراکم نسبی متفاوت ۳۰، ۶۰ و ۹۰ در شکل ۶ نشان داده شده است.

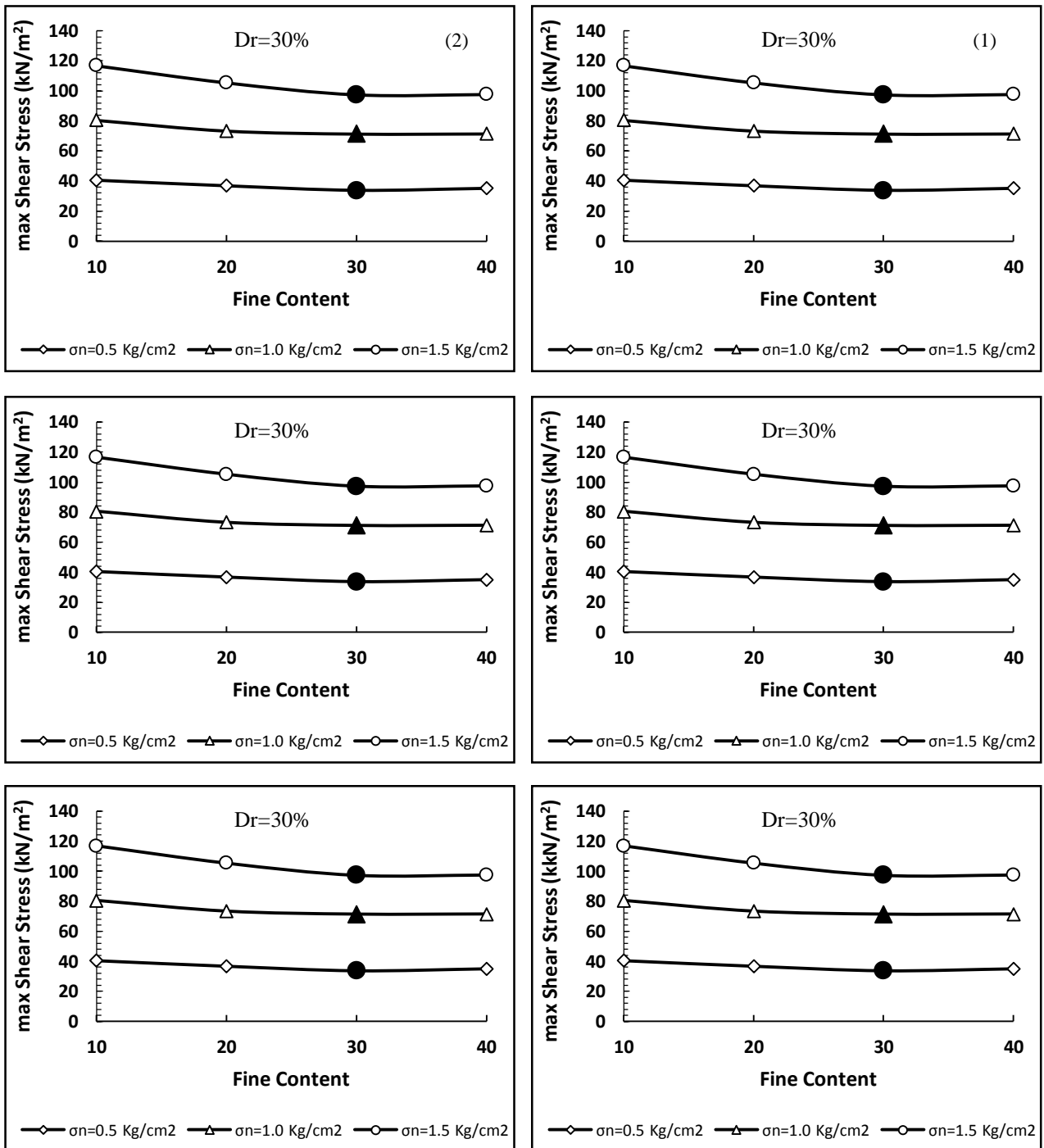
سرعت بارگذاری افقی ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه و کرنش‌های برشی تا ۱۵ درصد طول جعبه نمونه ادامه یافته است. برای آماده‌سازی هر نمونه، وزن مورد نیاز براساس تراکم نسبی و ابعاد جعبه برش مشخص گردید. سپس نمونه‌ها در دو درصد رطوبت بهینه و اشباع آماده شده‌اند که زمان اشباع کردن نمونه‌های حاوی سیلت به مدت حداقل ۴ ساعت و نمونه‌های حاوی رس به مدت حداقل ۱۶ ساعت بوده است. زیرا اطمینان حاصل شود که نمونه‌های حاوی رس به صورت کامل اشباع شده باشند.

۳-۲-۱- تحلیل نتایج آزمایش

در مطالعه حاضر آزمایش برش مستقیم با مقادیر متفاوت درصد ریزدانه و تراکم نسبی متفاوت با دو نوع ریزدانه سیلت و رس و دو درصد رطوبت بهینه و اشباع انجام شده است. مقاومت برشی حداکثر و زاویه اصطکاک حداکثر و چسبندگی به همراه زاویه اتساع برای نمونه‌ها محاسبه شد. حداکثر تنش برشی قابل تحمل توسط نمونه‌ها به عنوان مقاومت برشی حداکثر انتخاب گردید. زاویه اصطکاک داخلی نیز با رسم



شکل ۵. نمودار تغییرات تنش برشی - تغییر مکان برشی برای نمونه‌های با درصد تراکم ۹۰ درصد تحت تنش قائم ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، (۱): سیلت، (۲): رس



شکل ۶. تغییرات مقاومت برشی حداکثر برای مقادیر ریزدانه متفاوت تحت تراکم‌های نسبی متفاوت: (۱): سیلت، (۲): رس

۳-۲-۱. تغییرات رفتار اتساعی نمونه‌ها

شکل ۷ تغییرات حجم برای درصدهای مختلف سیلت و رس در تراکم نسبی ۹۰ درصد و سربار قائم ۱,۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده کاهش حجم نمونه‌ها در هر دو نوع درصد ریزدانه می‌باشد با این تفاوت که افزایش حجم نمونه‌های سیلتی بیشتر از نمونه‌های رسی می‌باشد چرا که افزایش پارامتر چسبندگی اجازه‌ی تغییر حجم زیادی به خاک نمی‌دهد.

در شکل ۸ تأثیر ریزدانه سیلت و رس بر زاویه اتساع در تراکم‌های ۶۰ و ۹۰ درصد و برای سربارهای متفاوت آورده شده است. با افزایش درصد ریزدانه، چه از نوع سیلت و چه از نوع رس، زاویه اتساع نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کاهش زاویه اتساع با افزایش ریزدانه به دلیل افزایش پارامتر چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌ها می‌باشد. به همین علت زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های رسی پایین‌تر از نمونه‌های مشابه سیلت می‌باشد چرا که رس به علت چسبندگی بودن، اجازه اتساع زیادی به خاک نمی‌دهد و زاویه اصطکاک داخلی پایین‌تری دارد.

در هر دو نوع ریزدانه سیلتی و رسی با افزایش سربار، زاویه اتساع حداکثر کاهش می‌یابد و با افزایش تراکم نسبی، زاویه اتساع افزایش می‌یابد ولی با افزایش تراکم نسبی، زاویه اتساع نمونه‌های حاوی سیلت بیشتر از نمونه‌های حاوی رس افزایش می‌یابد و اختلاف بین آن‌ها بیشتر می‌شود.

۳-۲-۳. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌ها

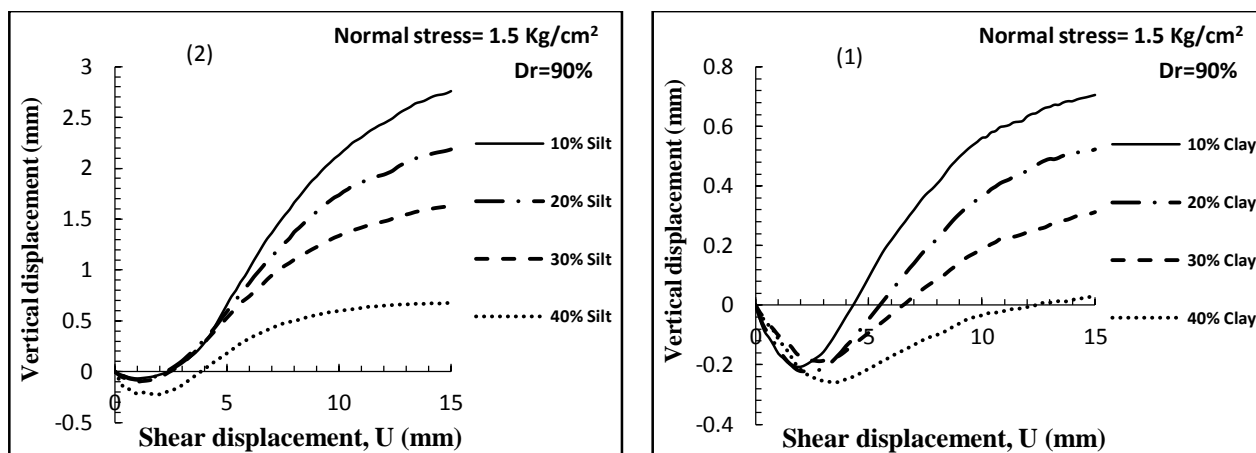
بر اساس نتایج این مطالعه در هر دو نوع خاک مخلوط، با افزایش ریزدانه چه از نوع سیلت و چه از نوع رس، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد. در شکل ۹ نمودار تأثیر ریزدانه سیلت و رس بر زاویه اصطکاک داخلی حداکثر در برابر درصد ریزدانه برای تراکم نسبی‌های متفاوت نشان داده شده است.

نقاط توپر در شکل ۶ - ب نشان‌دهنده‌ی ریزدانه انتقالی در مخلوط ماسه سیلت‌دار می‌باشد، در مقادیر کمتر از این مقدار، با افزایش سیلت، تنش برشی حداکثر کاهش می‌یابد و با رسیدن مقدار ریزدانه به ریزدانه انتقالی، مقاومت کمی افزایش می‌یابد. نکته‌ای که در این شکل مطرح است این است که در تراکم‌های نسبی ۶۰ و ۹۰ درصد، با افزایش سربار، مقدار ریزدانه انتقالی از ۲۰ درصد به ۳۰ افزایش یافته است. در واقع با افزایش ریزدانه، بخش درشت‌دانه‌ها در حالت سست‌تری قرار می‌گیرد و با افزایش سربار، فشار روی دانه‌ها زیادتر شده که منجر به آرایش و شکل‌گیری تماس بین درشت‌دانه‌ها می‌شود. لذا با افزایش سربار، مقدار ریزدانه انتقالی نیز افزایش می‌یابد چرا که ریزدانه بیشتری نیاز است تا مقاومت خاک در حالت حداقل قرار گیرد.

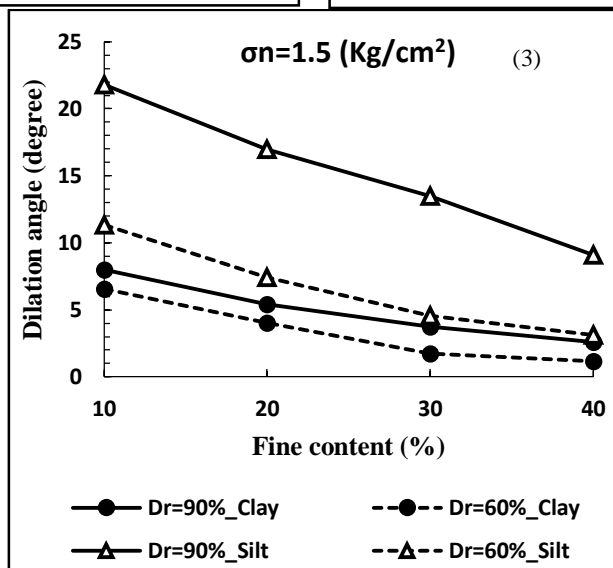
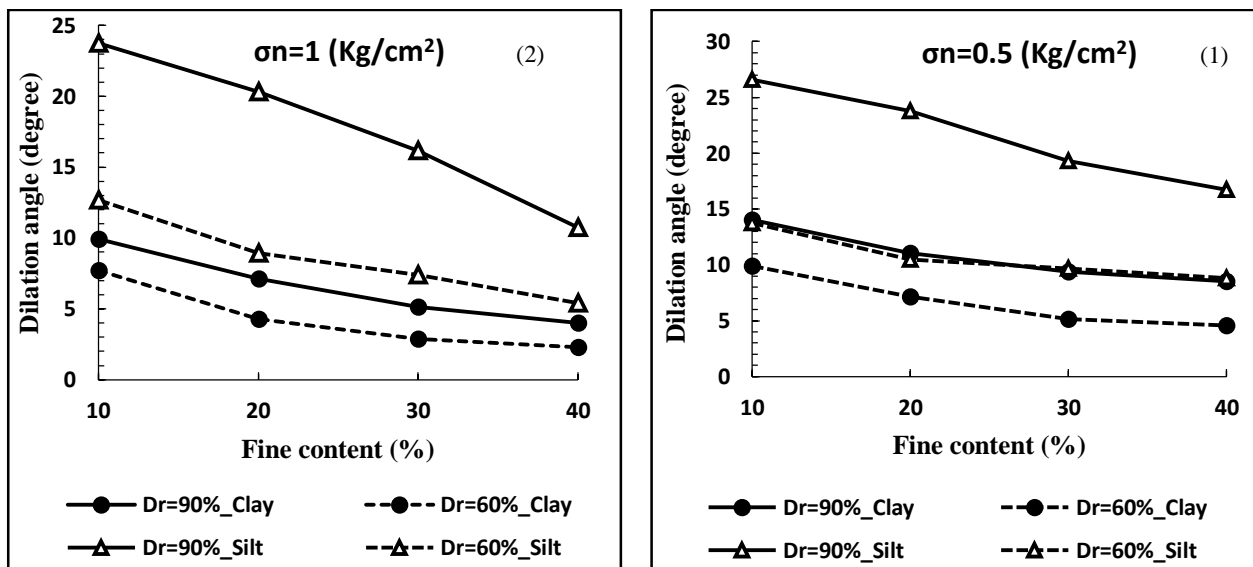
همانطور که در شکل ۶ - الف مشخص است، در مخلوط ماسه‌ی رس‌دار، با افزایش درصد رس، تغییرات تنش به ازای افزایش ریزدانه همواره نزولی است لذا رس همواره تأثیر منفی‌ای بر مقاومت برشی دارد.

همچنین در هر دو این نمودارها، با افزایش درصد تراکم، نمودارها شیب منفی بیشتری به خود می‌گیرند و این بدان معناست که با افزایش درصد تراکم در نمونه‌ها، میزان کاهش تنش برشی حداکثر، افزایش می‌یابد.

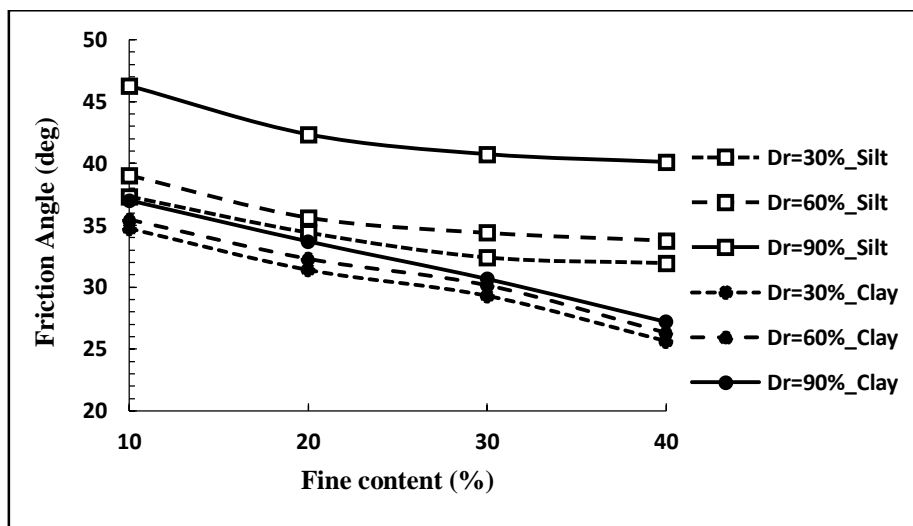
از سوی دیگر مقایسه ماسه سیلت‌دار در برابر ماسه‌رس‌دار نشان می‌دهد که با افزایش درصد ریزدانه، مقاومت مخلوط ماسه‌رس‌دار نسبت به ماسه سیلت‌دار بیشتر کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش درصد تراکم نیز میزان اختلاف بالاتر می‌رود. توجه این رفتار شکل ذرات رس می‌باشد که به علت صفحه‌ای شکل بودن در باربری شرکت نمی‌کنند و به همین علت ذرات رس در مقابل سیلت، مقاومت برشی را بیشتر کاهش می‌دهند. همچنین از نظر میزان سربار و تنش قائم در همه تراکم‌ها بیشترین تفاوت در مقاومت برشی به ازای سربار قائم ۱,۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع حاصل شده است.



شکل ۷. نمودار تغییر حجم برای نمونه‌های با درصد ریزدانه متفاوت (۱): رس و (۲): سیلت تحت سربار و تراکم نسبی یکسان



شکل ۸. مقایسه تأثیر ریزدانه سیلت و رس بر زاویه اتساع در سربارهای قائم (۱): ۰.۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، (۲): ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، (۳): ۱.۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع



شکل ۹. تغییرات زاویه اصطکاک با درصد سیلت و رس و تراکم نسبی متفاوت

ندارد و با افزایش مقدار ریزدانه، افزایش پارامتر چسبندگی نیز بیشتر می‌شود و البته این میزان افزایش برای نمونه‌های رسی بیشتر از نمونه‌های سیلتی می‌باشد و همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، شیب نمونه‌های رسی با افزایش درصد رس بیشتر از نمونه‌های سیلتی می‌گردد.

افزایش تراکم نیز در هر دو نوع ریزدانه، پارامتر چسبندگی را افزایش می‌دهد و در تراکم‌های بالاتر، اختلاف بین مقدار چسبندگی رس و سیلت نیز افزایش می‌یابد. بدین معنی که در تراکم‌های بالاتر، رس تأثیر بهتری نسبت به سیلت بر پارامتر چسبندگی دارد.

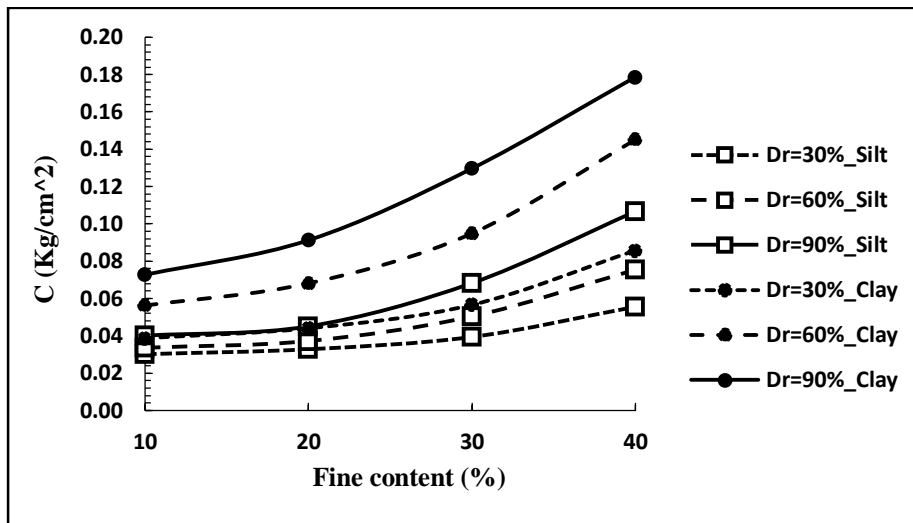
۳-۲-۴-۱. تأثیر درصد رطوبت بر مقاومت برشی

به منظور بررسی تأثیر رطوبت بر رفتار مقاومت برشی مخلوط ماسه - ریزدانه، آزمایش مقاومت برشی برای حالت اشباع تنها در درصد تراکم ۶۰ درصد و تحت سربارهای قائم متفاوت ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع انجام شد. شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب نمودار مقاومت برشی خاک ماسه سیلت‌دار و ماسه رس‌دار در حالت درصد رطوبت بهینه و اشباع، در فشار سربار قائم ۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع را نشان می‌دهد.

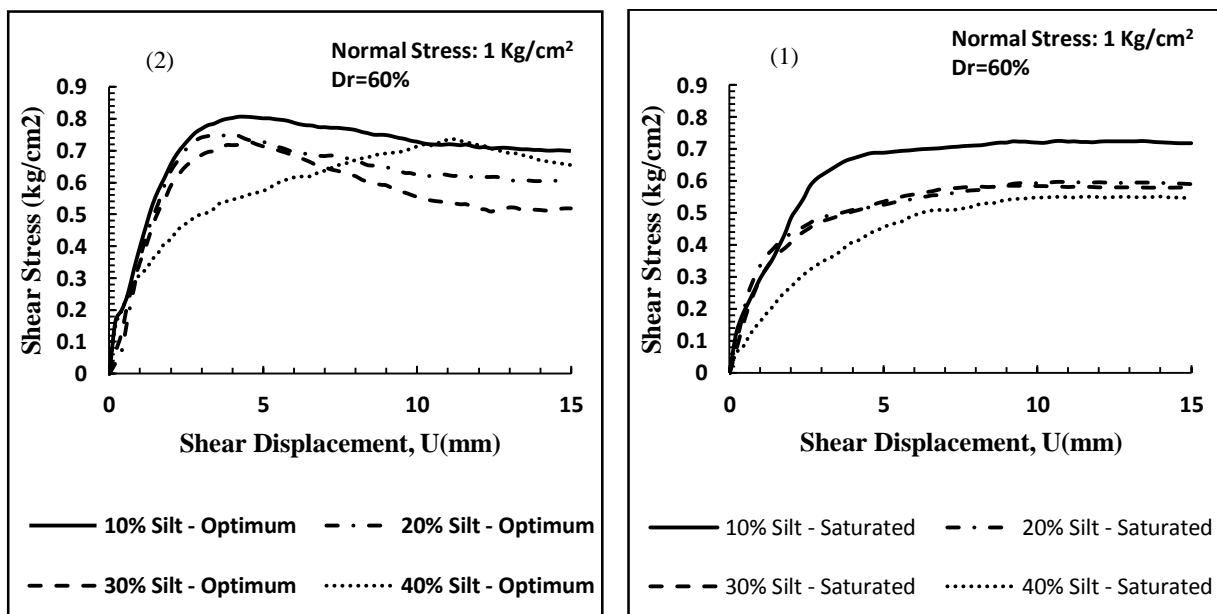
به طور کلی مقادیر زاویه اصطکاک مخلوط ماسه رس‌دار از مخلوط ماسه سیلت‌دار کمتر است. همچنین از نمودارها می‌توان دریافت که با افزایش درصد رس، شیب منفی نمودارها بیشتر می‌شود بدین معنی که ریزدانه رسی تأثیر بیشتری نسبت به ریزدانه سیلتی بر کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای دارد.

در درصد تراکم‌های بالاتر اختلاف بین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیلت‌دار و ماسه رس‌دار بیشتر می‌گردد بدین معنی که در تراکم‌های بالاتر رس نسبت به سیلت مقادیر زاویه اصطکاک داخلی را بیشتر کاهش می‌دهد؛ در واقع چه با افزایش مقدار رس و چه در تراکم‌های بالاتر، ذرات رس بهتر و بیشتر به ذرات ماسه می‌چسبند و خمیره واحدی را تشکیل می‌دهند، لذا زاویه اصطکاک داخلی بیشتر کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰ نیز نمودار پارامتر چسبندگی در برابر مقدار ریزدانه برای درصد تراکم نسبی‌های متفاوت خاک ماسه ترکیب شده با سیلت و رس نشان داده شده است. در هر دو نوع مخلوط، با افزایش ریزدانه، پارامتر چسبندگی افزایش می‌یابد. همانطور که انتظار می‌رود، مقادیر چسبندگی نمونه‌های رسی بالاتر از نمونه‌های سیلتی می‌باشد. افزایش پارامتر چسبندگی با افزایش درصد ریزدانه نسبت یکسانی



شکل ۱۰. تغییرات پارامتر چسبندگی با درصد سیلت و رس و تراکم نسبی متفاوت



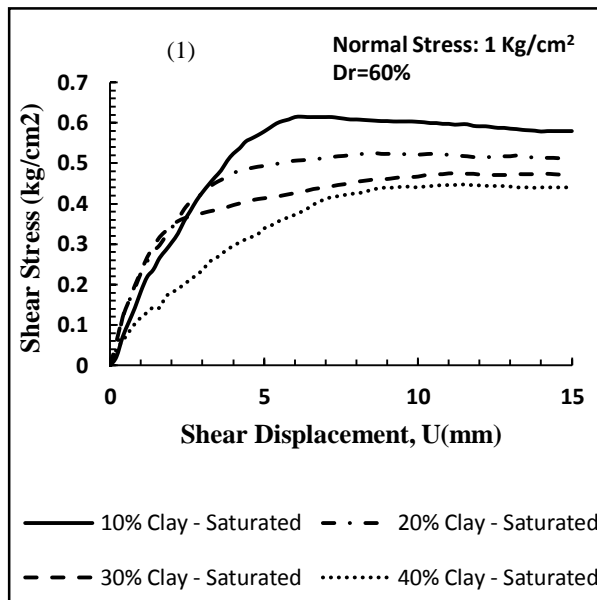
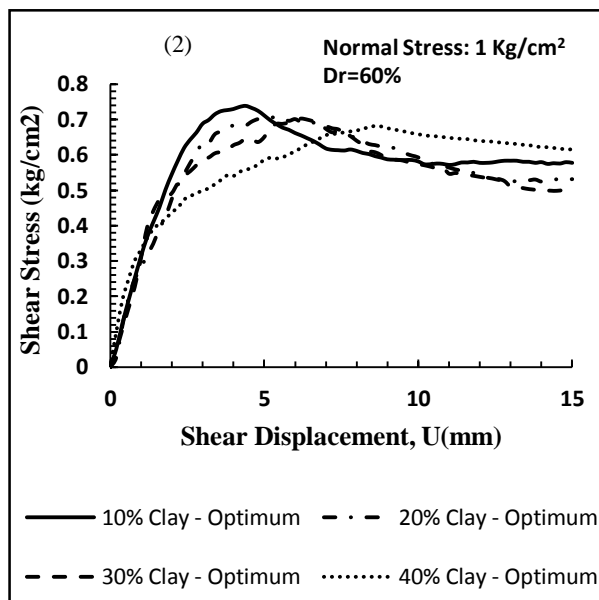
شکل ۱۱. نمودار تنش برشی - تغییر شکل برشی برای مخلوط ماسه سیلت دار در درصد رطوبت (۱): اشباع و (۲): بهینه

ندارند ولی در درصد رطوبت بهینه، در نمودارها نقطه اوج مشاهده می‌شود، چرا که در حالت اشباع، فضای بین دانه‌ها به طور کامل با آب پر شده است و نمونه نیز قابلیت زهکشی دارد و در طول آزمایش آب از میان دانه‌ها زهکشی می‌شود و این امر باعث می‌گردد که مقاومت برشی مدام روند افزایشی داشته باشد و نمونه گسیخته نشود. لازم به ذکر است که در شکل ۱۱ علت تفاوت قابل توجه نمودار مربوط به ۴۰ درصد

با مقایسه دو نمودار در درصد رطوبت‌های متفاوت واضح است که با افزایش درصد رطوبت، مقاومت برشی مخلوط‌ها افت دارد؛ چرا که حضور آب، سبب لغزش سنگ‌دانه بر روی یکدیگر می‌شود و افزایش درصد ریزدانه نیز به این لغزش کمک می‌کند، لذا مقاومت برشی مخلوط نسبت به حالت درصد رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. علاوه بر مقاومت برشی، شکل منحنی‌ها نیز تغییر کرده است. در حالت اشباع، رفتار نمونه‌ها انقباضی است، در واقع نمودارهای برش نقطه‌ای اوج

ناشی از خطای آزمایش باشد.

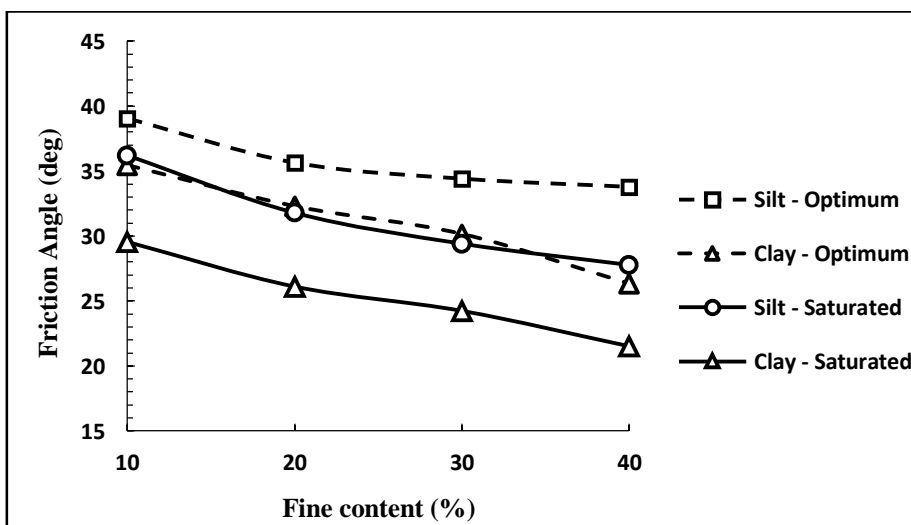
سیلت در رطوبت بهینه با سایر درصدهای سیلت، می تواند



شکل ۱۲. نمودار تنش برشی - تغییر شکل برشی برای مخلوط ماسه رس دار در درصد رطوبت (۱): اشباع و (۲): بهینه

و در هر دو مخلوط تقریباً با اشباع شدن نمونه، زاویه اصطکاک داخلی با ۱۰ درصد کاهش همراه است که علت آن حضور آب و در نتیجه لغزش راحت تر دانه‌ها روی یکدیگر می باشد.

نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصد ریزدانه، در دو درصد رطوبت اشباع و بهینه برای هر دو نوع مخلوط در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت اشباع پایین تر از درصد رطوبت بهینه می باشد



شکل ۱۳. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی حداکثر برای مخلوط ماسه رس دار و ماسه سیلت دار در درصد رطوبت بهینه و اشباع

۴. نتیجه گیری

مخلوط ماسه سیلت‌دار کمتر است. با افزایش ریزدانه اختلاف زاویه اصطکاک داخلی نمونه سیلتی و رسی بیشتر می‌شود یعنی ریزدانه رسی تأثیر بیشتری نسبت به ریزدانه سیلتی بر کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای دارد.

- با افزایش درصد ریزدانه، چه از نوع سیلت و چه از نوع رس، زاویه اتساع نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کاهش زاویه اتساع با افزایش ریزدانه به دلیل افزایش پارامتر چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌ها می‌باشد.

- در درصد تراکم‌های بالاتر اختلاف بین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیلت‌دار و ماسه‌رس‌دار نیز بیشتر می‌گردد بدین معنی که در تراکم‌های بالاتر رس تأثیر منفی‌تری نسبت به سیلت بر مقادیر زاویه اصطکاک داخلی دارد.

- در هر دو نوع مخلوط، با افزایش ریزدانه، پارامتر چسبندگی افزایش می‌یابد و مقادیر چسبندگی نمونه‌های رسی بالاتر از نمونه‌های سیلتی می‌باشد. لازم به ذکر است که در نمونه‌های رسی میزان رطوبت بسیار مهم و تاثیرگذار است.

- با افزایش درصد ریزدانه، پارامتر چسبندگی افزایش می‌یابد ولی با هر ۱۰ درصد افزایش ریزدانه، مقدار پارامتر چسبندگی به نسبت یکسانی افزایش نمی‌یابد؛ بلکه در درصد‌های ریزدانه بالاتر، میزان افزایش پارامتر چسبندگی بیشتر می‌شود و این میزان افزایش در نمونه‌های رسی بیشتر از نمونه‌های سیلتی می‌باشد که البته این مسئله تابع شرایط آزمایش و میزان رطوبت است.

- افزایش تراکم در هر دو نوع ریزدانه، در شرایط مشابه پارامتر چسبندگی را افزایش می‌دهد و در تراکم‌های بالاتر، اختلاف بین مقدار چسبندگی رس و سیلت افزایش می‌یابد. بدین معنی که در شرایط مقایسه‌ای مشابه رس تأثیر بهتری نسبت به سیلت بر پارامتر چسبندگی در تراکم‌های بالا دارد.

در این مطالعه با یک ایده جدید در ساخت نمونه‌ها، آزمایش برش مستقیم کوچک مقیاس بر روی خاک ماسه‌ای ترکیب شده با دو مقدار ریزدانه سیلت و رس در درصد تراکم و درصد رطوبت‌های متفاوت به منظور بررسی تأثیر نوع و مقدار ریزدانه بر رفتار خاک ماسه‌ای انجام شده است. نمونه‌ها با دو نوع ریزدانه متفاوت سیلت و رس، با درصد‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و در تراکم نسبی ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد ساخته شدند و تحت سربارهای قائم ۰،۵، ۱ و ۱،۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد آزمایش قرار گرفتند و در نهایت نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد. لازم به توضیح است که برخی از این نتایج توسط تحقیقات گذشته نیز تایید شده اند که در ابتدا به آنها اشاره می‌شود:

- در هر دو نوع مخلوط با افزایش درصد ریزدانه مقاومت برشی کاهش می‌یابد با این تفاوت که در مخلوط ماسه سیلت‌دار کاهش مقاومت تا حد خاصی از مقدار ریزدانه اتفاق می‌افتد و بعد از آن مقاومت برشی کمی افزایش می‌یابد اما در مخلوط ماسه رس‌دار، رس هیچ تأثیر مثبتی بر مقاومت برشی ندارد و همواره موجب کاهش آن می‌شود. همچنین با افزایش درصد ریزدانه، مقاومت مخلوط ماسه‌رس‌دار نسبت به ماسه سیلت‌دار بیشتر کاهش یافته و با افزایش درصد تراکم نیز این میزان اختلاف بالاتر می‌رود. از سوی دیگر با افزایش سربار در هر دو نوع ریزدانه سیلتی و رسی، زاویه اتساع حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تراکم نسبی، در هر دو نوع ریزدانه، زاویه اتساع افزایش یافته ولی زاویه اتساع نمونه‌های سیلتی بیشتر از نمونه‌های حاوی رس افزایش می‌یابد و اختلاف بین آن‌ها بیشتر می‌شود.

- در هر دو نوع خاک مخلوط، با افزایش هر دو نوع ریزدانه سیلت و رس، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاهش می‌یابد و به طور کلی مقادیر زاویه اصطکاک مخلوط ماسه رس‌دار از

منابع

- ASTM. 2007. ASTM D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Designation, A. S. T. M. D 4253-2000. Standard Test Methods for the Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table.
- Designation, A. S. T. M. D 4254-2000. Standard Test Methods for the Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density.
- Georgiannou, V., Hight, D., and Burland, J., 1991. Behaviour of clayey sands under undrained cyclic triaxial loading. *Géotechnique*, 41(3): 383-393.
- Kenny, T., 1977. Residual strength of mineral mixtures. *Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics*. Vol (1): 155-160.
- Koester, J. P., 1994. The influence of fines type and content on cyclic strength. In *Ground failures under seismic conditions*, ASCE. 17-33.
- Kuerbis, R., Negussey, D., and Vaid, Y. P., 1988. Effect of gradation and fines content on the undrained response of sand. *Geotechnical special publication*, (21): 330-345.
- Lade, P.V., Liggio, C., and Yamamuro, J.A., 1998. Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand. *Geotechnical testing journal*, 21: 336-347.
- Mitchell, J. K., and Soga, K., 2005. *Fundamentals of soil behavior Vol (3)*. New York: John Wiley & Sons.
- Monkul, M.M., and Ozden, G., 2007. Compressional behavior of clayey sand and transition fines content. *Engineering Geology*, 89(3-4):195-205.
- Ng, C. W. W., and Menzies, B., 2014. *Advanced unsaturated soil mechanics and engineering*. CRC Press.
- Ni, Q., Tan, T. S., Dasari, G. R., and Hight, D. W., 2004. Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils. *Géotechnique*, 54(9): 561-569.
- Noda, S., and Hyodo, M., 2013. Effects of fines content on cyclic shear characteristics of sand-clay mixtures. In *Proceedings of the Eighteenth International Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Conference*. 1551-1554.
- Novais-Ferreira, H., 1971. The clay content and the shear strength in sand clay mixtures. In *Soil Mech & Fdn Eng Proc/South Africa/ Vol (1)*.
- Polito, C.P., 1999. The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils. Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Polito, C. P., and Martin II, J. R., 2001. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(5): 408-415.
- Porcino, D. D., and Diano, V., 2017. The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101: 311-321.
- Zhiqing, L. I., Tao, L. I., Ruilin, H. U., Xiong, L. I., and Zhuangju, L. I., 2007. Methods for testing and predicting of SWCC in unsaturated soil mechanics. *Journal of engineering geology*, 15(5): 700-707.
- Salgado, R., Bandini, P., and Karim, A., 2000. Shear strength and stiffness of silty sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5): 451-462.
- Singh, S., 1996. Liquefaction characteristics of silts. *Geotechnical & Geological Engineering*, 14(1): 1-19.
- Skempton, A. W., 1985. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*, 35(1): 3-18.
- Thevanayagam, S., 2000. Liquefaction potential and undrained fragility of silty soils. In *proceedings of the 12th world conference earthquake engineering*. New Zealand Society of Earthquake Engineering, Wellington, New Zealand.
- Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S., and Liang, J., 2002. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(10): 849-859.
- Thevanayagam, S., Fiorillo, M., and Liang, J., 2000. Effect of non-plastic fines on undrained cyclic strength of silty sands. In *Soil Dynamics and Liquefaction*. 77-91.
- Thian, S. Y., and Lee, C. Y., 2011. Undrained response of mining sand with fines contents. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 1(4): 844-851.

-
- Vallejo, L. E., and Mawby, R., 2000. Porosity influence on the shear strength of granular material–clay mixtures. *Engineering Geology*, 58(2): 125-136.
- Vaid, Y. P., 1994. Liquefaction of silty soils. *Ground Failure Under Seismic Condition*. Geotechnical special publication 44, ASCE: 1-16.
- Van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.