

بررسی نقش عوامل تأثیرگذار در مشخصات رفتاری ماسه‌های رس‌دار

امید نعیمی فر (کارشناس ارشد)

سید شهاب‌الدین یتربی (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

وقوع چند مورد روان‌گرایی در ماسه‌های دارای مقادیر متنوعی از رس، در سال‌های گذشته، نشان داده است که علاوه بر ماسه‌های سیلت‌دار، ماسه‌های رس‌دار نیز تا حد زیادی پتانسیل روان‌گرایی دارند. از همین رو ضروری است در مورد خصوصیات این ترکیبات و مشخصات رفتاری آنها تحقیقات بیشتری صورت گیرد. در این نوشتار تأثیر درصد رس و خاصیت خمیری (پلاستیسیته) آن بر روی مشخصات رفتاری ماسه‌های رس‌دار در شرایط مختلف تراکم و فشار همه‌جانبه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با انجام حدود ۱۰۰ آزمایش سهمحوری استاتیکی بر روی نمونه‌های بازسازی شده‌ی ماسه‌ی دارای مقادیر متنوع رس‌های با خاصیت خمیری بالا و پایین، مطالعه‌ی جامعی در این زمینه صورت گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داده است که درصد رس و خاصیت خمیری آن به‌نحو محسوسی بر مقاومت بیشینه، مقاومت حالت پایدار، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و سایر مشخصات رفتاری ماسه‌ها تأثیرگذار است. علاوه بر این، نتایج مهمی در خصوص مقایسه‌ی میزان تأثیر درصد ریزدانه با میزان تأثیر خاصیت خمیری آن به دست آمده است.

واژگان کلیدی: روان‌گرایی، ماسه، رس، خاصیت خمیری، سهمحوری، استاتیک (مونوتیک).

۱. مقدمه

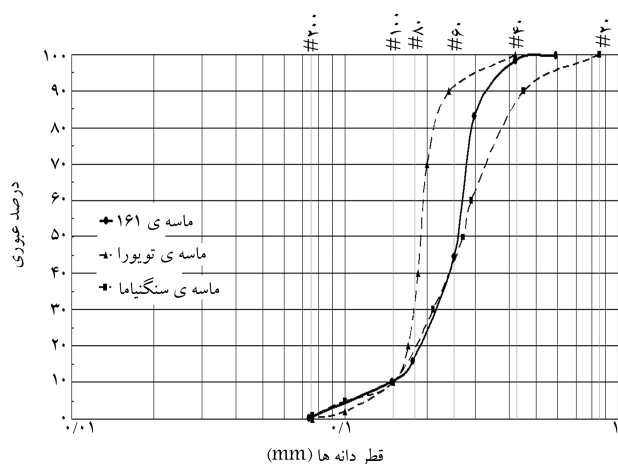
بررسی مشکلات ناشی از خاک‌ها از جمله مسائل قدیمی مورد توجه است. پدیده‌هایی مثل تحکیم، نشست یا تورم رس‌ها از جمله‌ی این مشکلات است. اما اصولاً تا پیش از شناخت پدیده‌هایی همچون روان‌گرایی، ماسه‌ها در ردیف خاک‌های مسئله‌دار معرفی نمی‌شدند. پس از وقوع روان‌گرایی و لغزش‌های جریانی در ضمن تعدادی از زلزله‌ها، از جمله زلزله‌های نینگاتا و آلاسکا (۱۹۶۴)، تحقیقات گسترده‌ی در رابطه با شناخت رفتار ماسه‌ها تحت شرایط مختلف آغاز شد.

این تحقیقات نشان داده است که به‌طور کلی، ماسه‌ها در شرایط زهکشی نشده (مثل زلزله یا بارگذاری‌های استاتیکی سریع) بسته به شرایط تراکم و فشار همه‌جانبه‌ی موجود، دارای سه رفتار کلی سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی و نرم‌شوندگی محدود با کرنش هستند.^[۶-۱] در رفتار نرم‌شوندگی با کرنش، مقاومت ماسه در نمودار تنش - کرنش از زمان رسیدن به نقطه‌ی اوج تا زمانی که به مقدار ثابت «مقاومت حالت پایدار» برسد، به‌شدت کاهش می‌یابد. در این حالت بسته به شرایط محیطی (مثل شیب زمین) و نیز تنش برشی پسماندی که در خاک به وجود می‌آید، تغییر شکل‌های بسیار بزرگی رخ می‌دهد که می‌تواند موجب زمین‌لرزه‌ها و خرابی شیب‌ها شود. در نرم‌شوندگی محدود با کرنش، مقاومت نمونه پس از کاهش اولیه، به‌علت پیدایش

خواص اتساعی در خاک، افزایش مجدد حجم آن و در نتیجه کاهش فشار آب حفره‌ی، دوباره افزایش می‌یابد و در نتیجه فقط یک حالت پایدار موقت از خود بروز می‌دهد. اگرچه بروز این رفتار (نسبت به حالت قبل) با تغییر شکل‌های محدودتری همراه است، به‌دلیل خرابی‌های قابل توجهی که در این حالت نیز می‌تواند رخ دهد، در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد شد که این حالت نیز نوعی از پدیده‌ی روان‌گرایی محسوب شود.^[۲]

تحقیقات بعدی نشان داده است که علاوه بر چگالی و عمق، نحوه‌ی لایه‌بندی^[۸،۷]، روش نمونه‌سازی^[۹-۱۱]، درصد ریزدانه^[۱۲-۱۸]، نوع ریزدانه^[۱۹-۲۳] و مسیر تنش اعمالی^[۲۴] از مهم‌ترین عواملی هستند که بر رفتار تنش - کرنش ماسه‌ها و تولید فشار آب حفره‌ی در آنها تأثیر می‌گذارند. بدین ترتیب برای درک رفتار واقعی ماسه‌ها در هنگام زلزله، باید رفتار تنش - کرنش و روند تولید فشار آب حفره‌ی در آنها مورد بررسی قرار گیرد.

چنان که گفته شد یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند بر مشخصات رفتاری خاک مؤثر باشد، درصد و نوع ریزدانه‌ی آن است. از آنجا که روان‌گرایی اولین بار در ماسه‌های تمیز و ماسه‌های سیلت‌دار مشاهده شد، تاکنون تحقیقات زیادی در مورد خصوصیات رفتاری این ماسه‌ها انجام شده است. براساس بیشترین نتایج به دست آمده، پتانسیل روان‌گرایی ماسه با افزایش درصد سیلت تا حد آستانه‌ی دچار افزایش



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی ۱۶۱ و مقایسه‌ی آن با منحنی دانه‌بندی ماسه‌های مشابه.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه و مقایسه‌ی آن با ماسه‌های تیورا و سنگنیاما.

خصوصیات	ماسه ۱۶۱	ماسه‌ی سنگنیاما	ماسه‌ی تیورا
چگالی ویژه (Gs)	۲٫۶۶	۲٫۷۲	۲٫۶۵
نسبت تخلخل حداکثر	۰٫۹۲۸	۰٫۹۱۱	۰٫۹۷۷
نسبت تخلخل کمینه	۰٫۵۸۳	۰٫۵۵۰	۰٫۵۹۷
D _{۵۰} (mm)	۰٫۲۶	۰٫۲۷	۰٫۱۷
D _{۱۰} (mm)	۰٫۱۵	۰٫۱۵	۰٫۱۵
درصد ریزدانه	۰	۲٫۳	۰
ضریب یکنواختی (C _U)	۱٫۸۰	۱٫۹۳	۱٫۲۶
ضریب خمیدگی (C _C)	۱٫۱۴	۱٫۰۲	۱٫۰۲

جدول ۲. مشخصات رس‌های با خاصیت خمیری پایین و بالا.

نوع رس	حد روانی (%LL)	حد خمیری (%PL)	شاخص خمیری (%PI)	Gs
رس درونگر (خاصیت خمیری کم)	۲۸	۱۷	۱۱	۲٫۶۴
رس قزوین (خاصیت خمیری نسبتاً زیاد)	۵۵	۲۵	۳۰	۲٫۶۴

۲۰۰)، در جدول ۲ ارائه شده است. این دو نوع رس به نحوی انتخاب شده‌اند که یکی دارای خاصیت خمیری پایین است و دیگری خاصیت خمیری نسبتاً بالایی دارد. رس با خاصیت خمیری بالا از اطراف شهر قزوین و رس با خاصیت خمیری پایین از سایت سد درونگر در استان خراسان به دست آمده است. اضافه کردن این دو نوع رس به ماسه در شرایط یکسان، امکان بررسی مناسب در مورد نحوه‌ی تأثیر خاصیت خمیری بر رفتار نمونه را فراهم کرده است. در شکل ۲ منحنی‌های دانه‌بندی رس‌های مورد استفاده همراه با منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی ۱۶۱ ارائه شده است.

می‌شود و با گذشتن از این حد و ادامه‌ی افزایش درصد سیلت، پتانسیل روان‌گرایی دوباره کاهش می‌یابد. [۱۴، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۵، ۲۶] بر این اساس، معیارهای متفاوتی نیز برای بررسی پتانسیل روان‌گرایی ارائه شده است که به‌کمک یکی از شاخص‌ترین آنها (نمودارهای سید و همکاران)، که امروزه نیز کاربرد گسترده‌ی دارد، می‌توان براساس نتایج آزمایش‌های صحرایی مانند نفوذ استاندارد یا نفوذ مخروط، مناطق دارای پتانسیل روان‌گرایی یا عدم پتانسیل روان‌گرایی را به‌ازای شتاب‌های مختلف زلزله از هم تفکیک کرد. [۲۷-۳۰]

برخلاف ریزدانه‌ی غیرخمیری، تأثیر ریزدانه‌های خمیری مثل رس چندان مورد توجه قرار نگرفته است. به نظر می‌رسد که این امر ناشی از این تفکر بوده است که چسبندگی رس مانع از رخداد پدیده‌هایی مثل روان‌گرایی در ماسه‌ها خواهد شد. به‌ر حال تحقیقات صورت‌گرفته در مورد زلزله‌هایی نظیر زلزله‌ی نورتریج (۱۹۹۴)، ککالی (۱۹۹۹) یا چی‌چی (۱۹۹۹) نشان داد در بسیاری از خاک‌هایی که بیش از ۱۵ درصد رس دارند، نشست‌های قابل توجهی ایجاد شده که منجر به خسارات زیادی شده است. [۳۱، ۳۲] علاوه بر این، ادامه‌ی تحقیقات نشان داد که در ماسه‌های رس‌دار، علاوه بر درصد ریزدانه عواملی چون خاصیت خمیری [۳۳-۳۵] - نسبت پیش‌تحکیم یا فتگی [۳۶] - و خواص آب حفره‌ی [۳۷-۳۹] نیز حائز اهمیت‌اند و می‌توانند بر رفتار ماسه‌های رس‌دار تأثیر بگذارند. این تحقیقات مؤید لزوم بازبینی آیین‌نامه‌های موجود است که می‌توان از آن جمله به اصلاحات پیشنهادی سید و همکاران برای آیین‌نامه‌ی چین اشاره کرد. [۴۰]

اصلی‌ترین مسئله‌ی که در مورد ماسه‌های رس‌دار مطرح می‌شود، مقایسه‌ی میزان تأثیرگذاری خاصیت خمیری ریزدانه با درصد آن است؛ زیرا به نظر می‌رسد خاصیت خمیری موجب افزایش مقاومت‌ها و کاهش پتانسیل روان‌گرایی می‌شود، در حالی که افزایش درصد ریزدانه تا حد زیادی به کاهش نفوذپذیری و افزایش تراکم‌پذیری خاک و در نتیجه افزایش پتانسیل روان‌گرایی می‌انجامد. نتایج حاصل از تعدادی از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه حاکی از آن است که خاصیت خمیری تأثیر بیشتری بر رفتار ماسه دارد [۴۱] در حالی که نتایج برخی دیگر از تحقیقات، درصد ریزدانه را عامل مهم‌تری در تعیین نوع رفتار معرفی می‌کنند. [۴۱] به هر حال از آنجا که بیشتر این تحقیقات در شرایط متفاوت و با استفاده از یک نوع رس انجام شده‌اند، نمی‌توان به‌درستی میزان تأثیر خاصیت خمیری و درصد ریزدانه را با هم سنجید. برای این منظور لازم است در شرایطی کاملاً مشابه، تأثیر افزایش درصد رس‌های با خاصیت خمیری متفاوت را روی نمودارهای تنش-کرنش، مسیر تنش و همچنین روند افزایش فشار آب حفره‌ی بررسی کرد.

۲. مشخصات مصالح

کلیده‌ی آزمایش‌های لازم برای این تحقیق براساس استاندارد ASTM انجام شده است. برای مصالح ماسه‌ی مورد استفاده در این آزمایش‌ها از ماسه‌ی سیلیسی فیروزکوه (ماسه‌ی ۱۶۱) استفاده شده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ ارائه شده است. این مصالح تشابهات زیادی با مصالح معروف - نظیر ماسه‌ی تیورا یا ماسه‌ی سنگنیاما - دارد و از این لحاظ می‌توان نتایج مربوط به آزمایش‌ها انجام شده بر ماسه‌ی ۱۶۱ را تا حدودی با نتایج مربوط به این ماسه‌ها مقایسه کرد. مشخصات فیزیکی این ماسه‌ها نیز در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۱ نیز منحنی‌های دانه‌بندی این ماسه‌ها با هم مقایسه شده است.

مشخصات رس‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها (رس‌های عبوری از الک

است که بتوان تأثیر هر پارامتر را در شرایطی که پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شده‌اند، مورد بررسی قرار داد. به‌طور کلی آزمایش‌های انجام‌شده شامل ساخت نمونه در دو وزن مخصوص خشک متفاوت بوده است که برای حالت سست ($D_r = 27\%$) ($D_r = 45\%$) و برای حالت با تراکم متوسط ($D_r = 45\%$) ($D_r = 27\%$) در نظر گرفته شده است. این دو مقدار دو نوع رفتار مرتبط با روان‌گرایی، یعنی نرم‌شدگی کامل با کرنش و رفتار حالت شبه پایدار را در ماسه‌ی تمیز نشان دادند.

در هردو مقادیر فوق، آزمایش‌ها بر روی ماسه‌ی تمیز و ترکیب آن با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس‌های با خاصیت خمیری بالا و پایین انجام شده است. علاوه بر این تمامی آزمایش‌ها در دو فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال تکرار شده‌اند تا تأثیر فشار همه‌جانبه نیز بر مشخصات رفتاری نمونه‌ها بررسی شود. همچنین مصالح رسی و ماسه‌یی به‌نحوی انتخاب شده‌اند که علاوه بر تأمین مشخصات مورد نیاز، چگالی ویژه (GS) نزدیک به هم نیز داشته باشند. بدین ترتیب نمونه‌ها علاوه بر این که در وزن مخصوص خشک و ثابت ساخته شده‌اند، دارای نسبت تخلخل ثابتی نیز هستند که در مقایسه‌ی نتایج بسیار مفید خواهد بود. نسبت تخلخل نمونه‌های با $\gamma_d = 1.45 \text{ gr/cm}^3$ و $\gamma_d = 1.5 \text{ gr/cm}^3$ به ترتیب برابر ۸۲۸/۰ و ۷۶۷/۰ است.

در این نوشتار هر ترکیب به‌صورت A-B-C نام‌گذاری شده است که در آن A نشان‌گر میزان تراکم نمونه، B نشان‌گر فشار تحکیم مؤثری که آزمایش در آن انجام شده است، و C نشان‌گر نوع رس مورد استفاده در ترکیب است. برای رس با خاصیت خمیری بالا ($PI = 30\%$) از حرف اختصاری H و برای رس دارای خاصیت خمیری پایین ($PI = 11\%$) از حرف اختصاری L استفاده شده است.

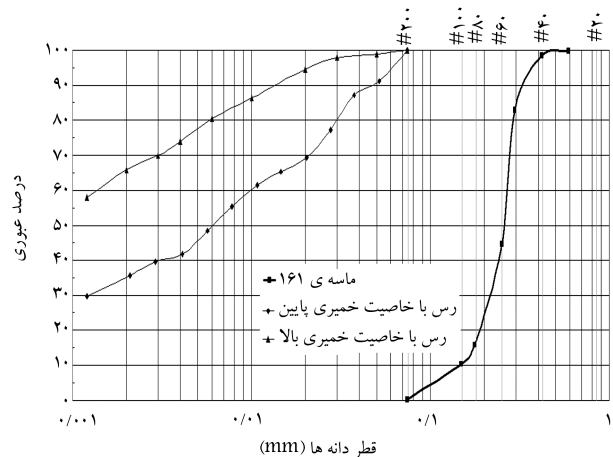
در مورد درصد رس نمونه‌ها هر جا که لازم بوده، مستقیماً به مقدار آن اشاره شده است. به‌عنوان مثال، ترکیب H-۴۰-۱/۴۵ نشان‌دهنده‌ی دسته نمونه‌هایی است که با تراکم ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته و تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۴۰۰ کیلوپاسکال تحکیم شده‌اند و برای ساخت آنها از ۱۵ درصد رس با خاصیت خمیری بالا استفاده شده است.

جدول ۳ و ۴ دسته‌بندی کلی آزمایش‌ها را برای ترکیب‌های مختلف ماسه و رس‌های با خاصیت خمیری بالا و پایین نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود در ۸ ترکیب متفاوت از چگالی، فشار همه‌جانبه و نوع رس، آزمایش‌ها بر روی ماسه‌ی تمیز و ترکیبات آن با صفر تا ۱۵ درصد رس انجام شده است. این طبقه‌بندی امکان بررسی تأثیر هر پارامتر، را زمانی که پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شده‌اند، فراهم کرده است.

۵. نتایج

در شکل ۳ نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی ترکیبات مختلف گروه L-۱۰-۱/۴۵ که دارای درصدهای مختلف رس هستند، نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، این نتایج به‌صورت نمودارهای مسیر تنش و تغییرات تنش تفاضلی و فشار آب حفره‌یی در مقابل کرنش، ارائه شده‌اند. در شکل ۴ نیز نتایج آزمایش‌ها انجام شده بر روی ترکیبات مختلف گروه L-۱۰-۱/۵ ارائه شده است.

در ادامه به جای ارائه مستقیم نمودارهای تنش - کرنش، مسیر تنش و با تغییرات فشار آب حفره‌یی در مقابل کرنش، مقادیر مقاومت حداکثر و مقاومت حالت



شکل ۲. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده.

۳. دستگاه و روش انجام آزمایش‌ها

دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها، یک دستگاه سه‌محوری استاتیکی است. قسمت‌های مختلف این دستگاه توسط حس‌گرهایی با حساسیت بالا تجهیز شده است که با ارتباط آنها به رایانه امکان ذخیره‌ی داده‌های مورد نیاز و تبدیل آنها به نمودارهای دلخواه فراهم شده است. سیستم اعمال بار به‌صورت کنترل کرنش بوده و در این آزمایش‌ها نرخ تغییر شکل ثابت ۰/۵ mm/min بر نمونه اعمال شده است. برای ساخت نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه از روش تراکم مرطوب استفاده شده است. بدین منظور، رس مورد نظر پس از خشک شدن از الک ۲۰۰ عبور داده شده و سپس با ماسه به‌خوبی مخلوط می‌شود تا کاملاً همگن شوند. سپس به این ترکیب آب اضافه می‌شود تا رطوبت آن به ۵ درصد برسد. وزن مورد نظر برای ایجاد نمونه در تراکم مناسب، در ۶ لایه به درون قالب ریخته شده و کوبیده می‌شود. نمونه‌های ساخته‌شده به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. روش تراکم مرطوب ممکن است به‌طور کامل ساختار واقعی خاک در محل را مدل نکند، اما محققین نشان دادند که تهیه‌ی نمونه به این روش از مزایای قابل توجهی برخوردار است.^[۱۳،۱۴] همگنی کامل نمونه در لایه‌های مختلف، عدم وقوع جداشدگی دانه‌ها از یکدیگر، امکان ساخت نمونه‌ی بسیار سست حتی با چگالی منفی و... از جمله‌ی این مزایا هستند. (علاوه بر این برای ایجاد همگنی کامل در ساخت نمونه‌ها، شیوه‌های اصلاحی لند (۱۹۷۸) مورد توجه قرار گرفته است).^[۱۰]

تمامی آزمایش‌ها به‌صورت تحکیم‌یافته - زهکشی‌نشده انجام شده‌اند. برای اشباع نمونه‌ها ابتدا گاز CO₂ از درون نمونه عبور داده شده و آنگاه آب از هوا خالی‌شده^۱ به آرامی از درون نمونه عبور داده می‌شود. برای رسیدن به اشباع کامل از پس فشاری در حدود ۴۰ کیلوپاسکال در آزمایش‌ها استفاده شده است. در تمامی آزمایش‌ها رسیدن به مقدار B-Value برابر یا بزرگ‌تر از ۰/۹۷ به‌منزله‌ی اشباع کامل نمونه در نظر گرفته شد. بعد از رسیدن به اشباع کامل، نمونه‌ها تا فشار تحکیمی مورد نظر تحکیم شدند و آنگاه تحت برش قرار گرفتند.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

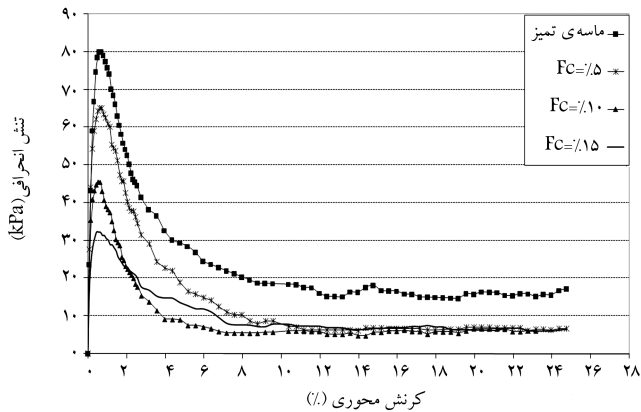
در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای «درصد ریزدانه»، «خاصیت خمیری ریزدانه»، «تراکم و فشار همه‌جانبه»، شرایط اولیه‌ی آزمایش‌ها به‌نحوی تنظیم شده

جدول ۳. طبقه‌بندی کلی آزمایش‌ها برای ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری پایین.

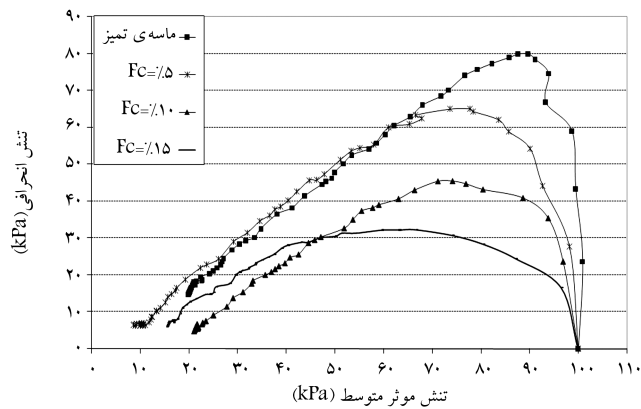
گروه	آزمایش	ترکیبات
گروه ۱: ۱۰۰ - ۱/۴۵ - L	۱	ماسه‌ی تمیز
	۲	ماسه + ۵ درصد رس
	۳	ماسه + ۱۰ درصد رس
	۴	ماسه + ۱۵ درصد رس
گروه ۲: ۱۰۰ - ۱/۵ - L	۵	ماسه‌ی تمیز
	۶	ماسه + ۵ درصد رس
	۷	ماسه + ۱۰ درصد رس
	۸	ماسه + ۱۵ درصد رس
گروه ۳: ۴۰۰ - ۱/۴۵ - L	۹	ماسه‌ی تمیز
	۱۰	ماسه + ۵ درصد رس
	۱۱	ماسه + ۱۰ درصد رس
	۱۲	ماسه + ۱۵ درصد رس
گروه ۴: ۴۰۰ - ۱/۵ - L	۱۳	ماسه‌ی تمیز
	۱۴	ماسه + ۵ درصد رس
	۱۵	ماسه + ۱۰ درصد رس
	۱۶	ماسه + ۱۵ درصد رس

جدول ۴. طبقه‌بندی کلی آزمایش‌ها برای ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری بالا.

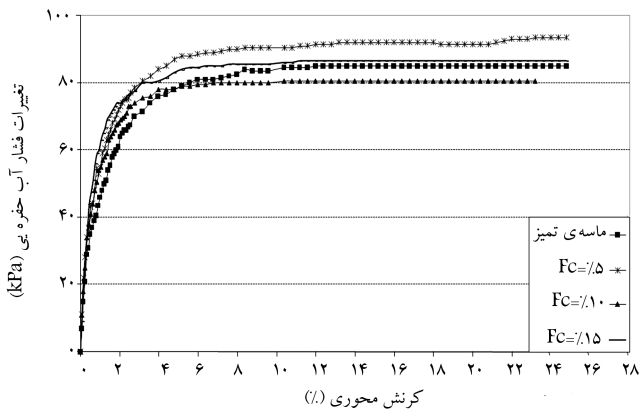
گروه	آزمایش	ترکیبات
گروه ۵: ۱۰۰ - ۱/۴۵ - H	۱۷	ماسه‌ی تمیز
	۱۸	ماسه + ۵ درصد رس
	۱۹	ماسه + ۱۰ درصد رس
گروه ۶: ۱۰۰ - ۱/۵ - H	۲۰	ماسه + ۱۵ درصد رس
	۲۱	ماسه‌ی تمیز
	۲۲	ماسه + ۵ درصد رس
	۲۳	ماسه + ۱۰ درصد رس
گروه ۷: ۴۰۰ - ۱/۴۵ - H	۲۴	ماسه + ۱۵ درصد رس
	۲۵	ماسه‌ی تمیز
	۲۶	ماسه + ۵ درصد رس
	۲۷	ماسه + ۱۰ درصد رس
گروه ۸: ۴۰۰ - ۱/۵ - H	۲۸	ماسه + ۱۵ درصد رس
	۲۹	ماسه‌ی تمیز
	۳۰	ماسه + ۵ درصد رس
	۳۱	ماسه + ۱۰ درصد رس
	۳۲	ماسه + ۱۵ درصد رس



الف) نمودارهای تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری؛



ب) نمودارهای مسیر تنش؛



ج) نمودارهای تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ی در مقابل کرنش.

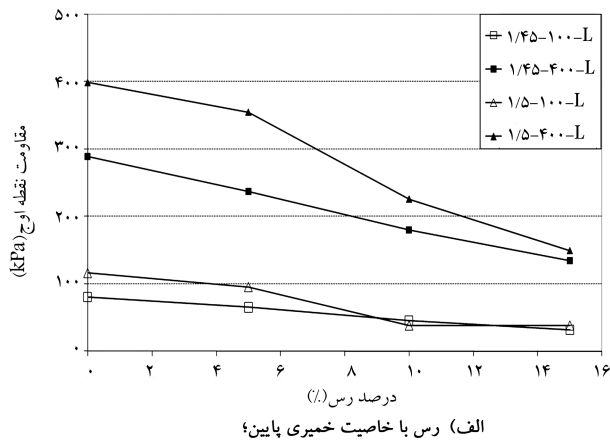
شکل ۳. نتایج مربوط به ترکیبات ۱۰۰-۱/۴۵-۱ در درصد‌های مختلف رس.

۶. تحلیل نتایج

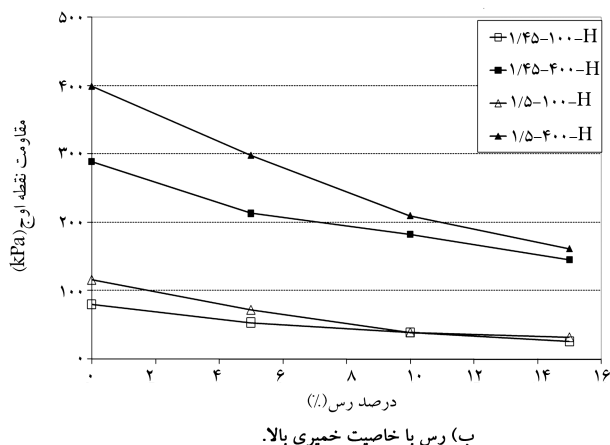
۱.۶. بررسی تغییرات مقاومت حداکثر در نمودار تنش-کرنش

۱.۶.۱. تأثیر درصد رس، تراکم و فشار همه‌جانبه بر مقاومت بیشینه در شکل ۵ تغییرات مقاومت نقطه‌ی اوج در مقابل درصد رس، برای ترکیبات مختلف ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری پایین و بالا رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد رس در تمامی نمودارها، مقاومت نقطه‌ی اوج کاهش می‌یابد. تصاویر میکروسکوپی گرفته شده (تصویر ۱) نشان می‌دهد که با افزایش درصد رس

پایدار و یا سایر نتایج مربوطه از آنها استخراج شده است و به‌صورت نمودارهای گوناگون ارائه شده است. بدین ترتیب امکان مقایسه بهتر و دقیق‌تر تغییرات این پارامترها تحت شرایط گوناگون فراهم شده است. اطلاعات بیشتر و نتایج کامل مربوط به آزمایش‌ها انجام شده بر روی ترکیبات مختلف سایر گروه‌ها، توسط نعیمی ارائه شده است.^[۴۱]

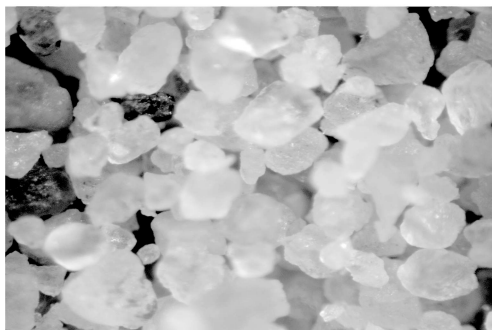


الف) رس با خاصیت خمیری پایین؛



ب) رس با خاصیت خمیری بالا.

شکل ۵. تأثیر فشار همه‌جانبه و تراکم بر مقاومت برشی پیش‌بینی ترکیبات ماسه.

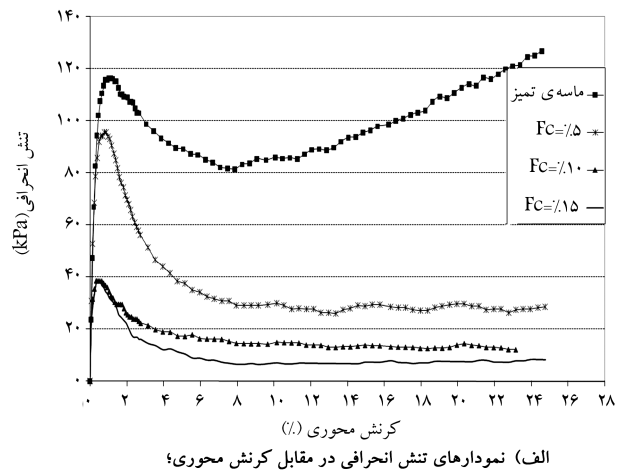


الف) عکس میکروسکوپی ماسه تمیز (MF: 40X-6X, 1/45)؛

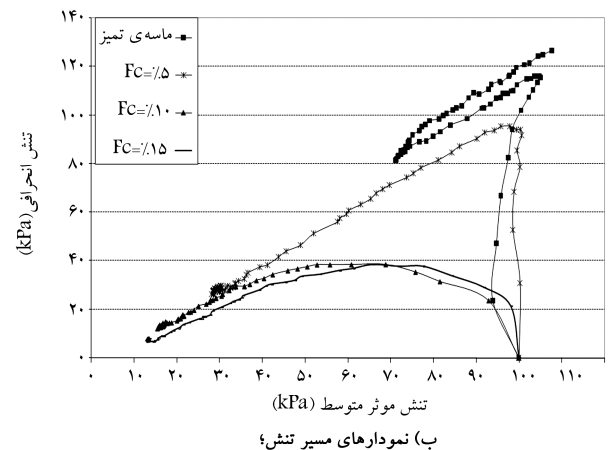


ب) عکس میکروسکوپی ماسه دارای ۱۵ درصد رس با خاصیت خمیری بالا (MF: 40X-6X, 1/45).

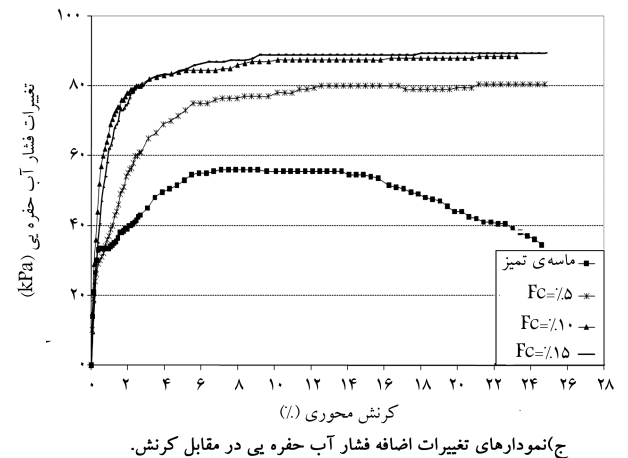
تصویر ۱. مقایسه‌ی بافت میکروسکوپی ماسه‌ی تمیز و ماسه رس‌دار.



الف) نمودارهای تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری؛



ب) نمودارهای مسیر تنش؛

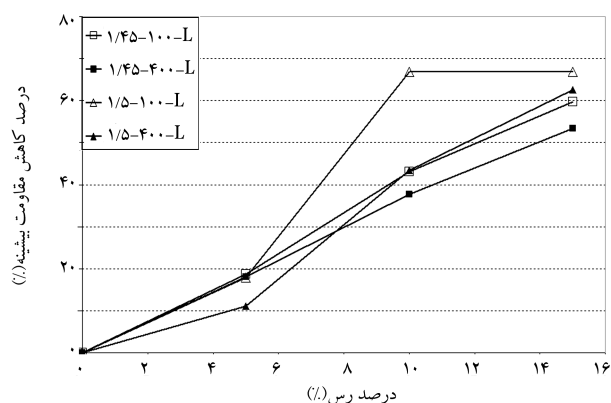


ج) نمودارهای تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ی در مقابل کرنش.

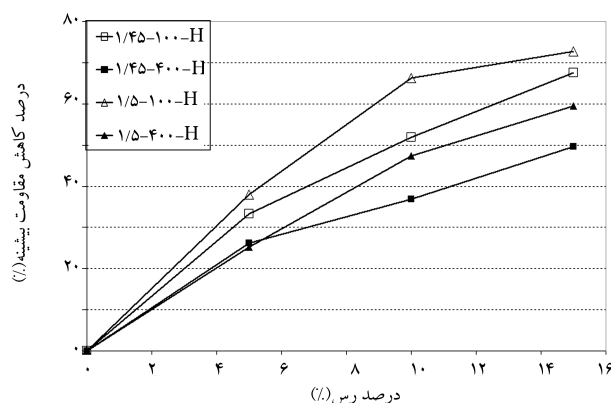
شکل ۴. نتایج مربوط به ترکیبات 100-175-L در درصد‌های مختلف رس.

در ماسه، ساختارهایی زنجیره‌ی در بافت آن به وجود می‌آید که در آن ذرات رس به صورت پل‌هایی ناپایدار در بین دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند. این نوع ساختارها به علت پایین بودن درصد رس چندان پایدار نیستند و در زمان رسیدن نمونه به نقطه‌ی اوج، بر اثر بار وارده دچار شکست شده و به درون فضاهای خالی ایجاد شده بین آنها فرو می‌ریزند. در نتیجه‌ی این فرایند، کاهش شدیدی در مقاومت نقطه‌ی اوج به وجود می‌آید.

تحقیقات مشابه نیز نشان داده‌اند که وقتی ریزدانه‌های رسی در حد فاصل دانه‌های ماسه‌ی قرار بگیرند، تأثیر زیادی بر رفتار مشاهده شده خواهد داشت، در



الف) رس با خاصیت خمیری پایین؛



ب) رس با خاصیت خمیری بالا.

شکل ۶. درصد کاهش مقاومت بیشینه با افزایش درصد رس برای ترکیبات ماسه.

که در آن q_p نشانگر مقاومت نقطه‌ای اوج هر ترکیب دلخواه؛ $q_{p_{cs}}$ نشانگر مقاومت نقطه‌ای اوج ماسه‌ی تمیز مربوط به همان ترکیب دلخواه است.

در نمودارهای شکل ۶ از مقایسه‌ی ترکیبات $1/45-100-L(H)$ با $1/45-400-L(H)$ و $1/5-100-L(H)$ با $1/5-400-L(H)$ مشاهده می‌شود که هم در رس‌های با خاصیت خمیری بالا و هم در رس‌های با خاصیت خمیری پایین، نمودارهای مربوط به فشار همه‌جانبه‌ی بیشتر، پایین‌تر قرار گرفته‌اند. این بدان معناست که با یک افزایش یکسان در درصد رس، هرچه فشار همه‌جانبه بالاتر باشد مقاومت نقطه‌ای اوج (نسبت به مقاومت اوج ماسه‌ی تمیز) کم‌تر کاهش می‌یابد. یعنی مقاومت بیشینه‌ی ماسه‌هایی که در اعماق کم‌تر قرار گرفته‌اند، نسبت به تغییرات درصد رس حساس‌تر است.

اکنون اگر نمودارهای ترکیبات $1/45-100-L(H)$ را با $1/5-100-L(H)$ ، $1/45-400-L(H)$ را با $1/5-400-L(H)$ مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که نمودارهای مربوط به تراکم بیشتر، بالاتر قرار می‌گیرند. یعنی با افزایش درصد رس تا یک مقدار یکسان، تراکم بالاتر موجب کاهش بیشتر در مقاومت نقطه‌ای اوج خواهد شد. این امر به معنی تأثیرپذیری بیشتر ماسه‌های متراکم‌تر از اضافه شدن رس است.

۲.۶. بررسی تغییرات مقاومت حالت پایدار

در رفتارهای نرم‌شوندگی با کرنش یا نرم‌شوندگی محدود با کرنش که معمولاً در مورد ماسه‌های سست یا با تراکم متوسط رخ می‌دهد، مقاومت ماسه پس از رسیدن به

حالی که اگر ریزدانه‌ها تنها فضای خالی بین دانه‌های درشت‌تر را پر کنند، تأثیر به‌مراتب کم‌تری دارند. [۲۲]

نتایج به‌دست آمده از تحقیقات انجام‌شده بر روی ترکیبات ماسه با رس کاتولن (با $PI=10$) نشان می‌دهد که با افزایش درصد رس تا ۷ درصد مقاومت نقطه‌ای اوج کاهش و بعد از آن دوباره افزایش می‌یابد. [۲۳، ۲۴] نتایج دیگر تحقیقات نیز روند مشابهی را با حد آستانه‌ی ۳۰ درصد نشان داده است. [۲۴] از سوی دیگر نشان داده شده است که با افزایش درصد رس تا ۱۵ درصد، مقاومت اوج کاهش می‌یابد [۱۲] اما در ۲۰ درصد رس این روند معکوس می‌شود. با جمع‌بندی این نتایج و برخی نتایج به‌دست آمده توسط محققین دیگر، ممکن است در این مطالعه نیز با ادامه‌ی افزایش درصد رس بعد از ۱۵ درصد یک حد آستانه مشاهده شود.

در شکل ۵، از مقایسه‌ی نمودارهای ترکیبات $1/45-100-L(H)$ با $1/45-400-L(H)$ و $1/5-100-L(H)$ با $1/5-400-L(H)$ در تراکم یکسان با افزایش فشار همه‌جانبه، مقاومت نقطه‌ای اوج ماسه‌ی تمیز و ترکیبات آن با رس افزایش می‌یابد که ناشی از فرورفتن بیشتر دانه‌ها در هم و درگیر شدن بیشتر آنها و افزایش نیروی وارده بر واحد سطح دانه‌ها است.

اکنون از مقایسه‌ی نمودارهای ترکیبات $1/45-100-L(H)$ با $1/45-400-L(H)$ و $1/5-100-L(H)$ با $1/5-400-L(H)$ در شکل ۵، مشخص می‌شود که اولاً در فشار همه‌جانبه‌ی یکسان با بالا رفتن میزان تراکم، مقدار مقاومت اوج هم افزایش خواهد یافت. ثانیاً با افزایش مقدار رس، این نمودارها به هم نزدیک می‌شوند که این امر بیانگر آن است که با افزایش درصد رس از تأثیر تراکم بر مقاومت نقطه‌ای اوج کاسته می‌شود. باید توجه داشت که با افزایش تراکم، انتظار می‌رود مقاومت نقطه‌ای اوج افزایش یابد. از سوی دیگر، در درصد‌های بالای رس، افزایش تراکم موجب می‌شود که فضای خالی بین دانه‌ها کاهش یابد و در نتیجه رس بیشتری بین دانه‌ها رانده می‌شود که این امر منجر به کاهش احتمالی مقاومت خواهد شد؛ یعنی تأثیر افزایش چگالی تا حدودی خنثی می‌شود که این امر منجر به کاهش تأثیر تراکم در درصد‌های بالای رس می‌شود.

۲.۱.۶. بررسی تأثیر خاصیت خمیری بر تغییرات مقاومت بیشینه

در شکل ۵، از مقایسه‌ی مقادیر مقاومت بیشینه‌ی مربوط به دو نوع رس با خاصیت خمیری متفاوت در درصد رس یکسان و در شرایط مشابه تراکم و فشار همه‌جانبه، مشاهده خواهد شد که مقاومت بیشینه‌ی ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری کم‌تر معمولاً دارای مقادیر بالاتری است. با توجه به عکس‌های میکروسکوپی، این امر می‌تواند به علت تشدید ساختارهای ناپایدار تشکیل‌شده در ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری بالاتر باشد.

۳.۱.۶. بررسی تأثیر تنش همه‌جانبه و تراکم روی درصد تغییرات

مقاومت بیشینه‌ی یک نهشته‌ی ماسه‌یی

در شکل ۶، چنان که مشاهده می‌شود، محور عمودی بیانگر درصد تغییرات مقاومت نقطه‌ای اوج است که به صورت درصد تغییر مقاومت نقطه‌ای اوج ترکیبات ماسه‌ی رس‌دار نسبت به مقاومت نقطه‌ای اوج ماسه‌ی تمیز در شرایط یکسان فشار همه‌جانبه، خاصیت خمیری رس و تراکم محاسبه شده است (رابطه ۱):

$$\Delta q_p (\%) = -\left(\frac{q_p - q_{p_{cs}}}{q_{p_{cs}}}\right) \times 100 \quad (1)$$

در درصد رس بالاتر از ۱۰ درصد مشاهده می‌شود که نمودارها به هم نزدیک‌تر شده‌اند و تأثیر تراکم کم‌رنگ‌تر شده است. اساساً، از آنجا که نیروهای قفل‌وبست بین دانه‌بی در نمونه‌های متراکم‌تر بیشترند، لذا تأثیر اضافه‌شدن رس در آنها به مراتب محسوس‌تر است. با گذشتن درصد رس از ۵ درصد و کاهش قابل ملاحظه‌ی این نیروها، نمونه‌های دارای تراکم‌های متفاوت روندهای مشابه‌تری را نشان می‌دهند. همچنین با مقایسه‌ی اعداد شکل ۷الف با شکل ۷ب در شرایط مشابه، کاملاً مشهود است که با افزایش فشار همه‌جانبه بر میزان مقاومت حالت پایدار نیز افزوده می‌شود. نتایج به دست آمده توسط برخی از محققین که با ترکیبات ماسه با رس کاتولن (با $PI=30\%$) انجام شده است، کاهش در مقاومت حالت پایدار با افزایش درصد رس تا ۷ درصد را نشان داده است.^[۲۴] نتایج دیگر محققین نیز در ارتباط با ترکیبات ماسه با رس (با $PI=10\%$) نشان‌گر کاهش مشابه در مقاومت حالت پایدار با افزایش درصد رس تا ۷ درصد است.^[۳۶] همچنین افزایش درصد رس تا ۱۵ درصد به کاهش مقاومت حالت پایدار منجر شده است، در حالی که با ادامه‌ی افزایش درصد رس این روند معکوس می‌شود.^[۱۲]

۲.۲.۶. تأثیر خاصیت خمیری بر تغییرات مقاومت حالت پایدار

نکته‌ی که در هر دو شکل فوق به چشم می‌خورد این است که با افزایش خاصیت خمیری رس در شرایط مشابه، نمودارها بالاتر قرار می‌گیرند (مثلاً با مقایسه‌ی ترکیب -L ۱۰۰-۱/۴۵ یا H ۱۰۰-۱/۴۵، یا L ۴۰۰-۱/۴۵ یا H ۴۰۰-۱/۴۵). این موضوع نشان می‌دهد که با ثابت ماندن سایر عوامل (تراکم و فشار مؤثر تحکیمی) در درصد رس یکسان، رس با خاصیت خمیری بیشتر مقاومت حالت پایدار بیشتری را نتیجه می‌دهد. همچنین نتایج سایر محققین نشان داده است که افزایش خاصیت خمیری در درصد رس مشابه موجب افزایش مقاومت حالت پایدار خواهد شد.^[۲۴] به نظر می‌رسد که بالاتر رفتن خاصیت خمیری رس موجب می‌شود که لغزیدن دانه‌ها بر روی هم در کرنش‌های بزرگ به خاطر چسبندگی رس کمی سخت‌تر شود و لذا ترکیبات ماسه با رس با خاصیت خمیری بالاتر، مقاومت حالت پایدار بیشتری را نشان دهند. همچنین کاوخته‌های تشکیل‌شده در ترکیب ماسه با رس با خاصیت خمیری بالا، محکم‌تر و بزرگ‌ترند و لذا اصطکاک بیشتری را در ضمن لغزش ایجاد می‌کنند. در این زمینه در بخش ۴.۶. توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

۳.۲.۶. تأثیر فشار همه‌جانبه و تراکم یک نهشته‌ی ماسه‌بی بر درصد

تغییرات مقاومت حالت پایدار

در این قسمت تأثیر عوامل مختلف بر درصد کاهش مقاومت حالت پایدار نسبت به مقاومت حالت پایدار ماسه تمیز بررسی شده است. در نمودارهای شکل ۸ محور عمودی نشان‌گر درصد کاهش مقاومت حالت پایدار نسبت به مقاومت حالت پایدار ماسه‌ی تمیز در شرایط مشابه است:

$$\Delta q_{ss}(\%) = -\left(\frac{q_{ss} - q_{ss_{cs}}}{q_{ss_{cs}}}\right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن، q_{ss} نشان‌گر مقاومت حالت پایدار هر ترکیب دلخواه و $q_{ss_{cs}}$ نشان‌گر مقاومت حالت پایدار ماسه‌ی تمیز مربوط به همان ترکیب دلخواه است.

در شکل ۸ درصد کاهش مقاومت حالت پایدار در مقابل درصد رس برای ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری پایین و بالا رسم شده است. چنانچه در شکل ۵، ترکیب (H) L-۱۰۰-۱/۴۵ را با (H) L-۴۰۰-۱/۴۵، یا ترکیب (H)-L ۱۰۰-۱/۵ را با (H) L-۴۰۰-۱/۵ مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که نمودارهای مربوط به فشار همه‌جانبه‌ی بالاتر، پایین‌تر قرار می‌گیرند. این امر بدان معناست که با یک افزایش یکسان در درصد رس، هرچه فشار همه‌جانبه بالاتر باشد، درصد

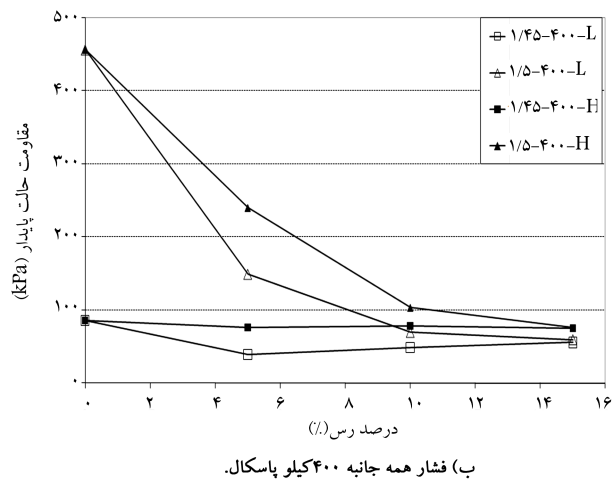
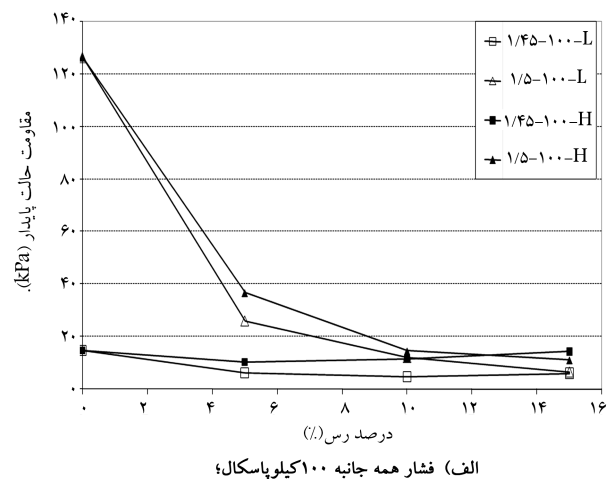
یک مقدار اوج دچار کاهش می‌شود و این کاهش تا رسیدن آن به یک حالت پایدار دائمی و یا موقتی ادامه می‌یابد. حالت پایدار اصولاً به حالتی اطلاق می‌شود که در آن نمونه خاک در حجم ثابت، تنش برشی و تنش نرمال ثابت و سرعت تغییر شکل ثابت، به صورت دائمی و پیوسته تغییر شکل می‌دهد. در این قسمت تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مقاومت برشی حالت پایدار مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۲.۶. تأثیر درصد رس، فشار همه‌جانبه و تراکم بر تغییرات مقاومت حالت

پایدار

در شکل ۷ تغییرات مقاومت حالت پایدار (q_{ss}) در مقابل درصد رس برای ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری پایین و بالا در فشارهای همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال رسم شده‌اند.

در شکل ۷ از مقایسه‌ی ترکیبات L-۱۰۰-۱/۴۵ با L-۴۰۰-۱/۴۵، یا مقایسه‌ی ترکیب H-۱۰۰-۱/۴۵ با H-۴۰۰-۱/۴۵ مشخص می‌شود که در نمونه‌های متراکم‌تر ($\gamma_d=1.5 \text{ gr/cm}^3$)، میزان مقاومت بالاتر است اما با افزایش درصد رس تا حدود ۵ درصد، این مقاومت به شدت کاهش می‌یابد و از ۱۰ درصد به بعد، تقریباً ثابت می‌ماند. علت کاهش شدید تا ۵ درصد، قرارگیری رس در فضای بین دانه‌های ماسه و کاهش شدید قفل‌وبست بین دانه‌ها در نمونه‌های متراکم‌تر است که موجب کاهش انرژی لازم برای شکستن این قفل‌وبست‌ها می‌شود.



شکل ۷. تأثیر افزایش درصد رس بر مقاومت حالت پایدار.

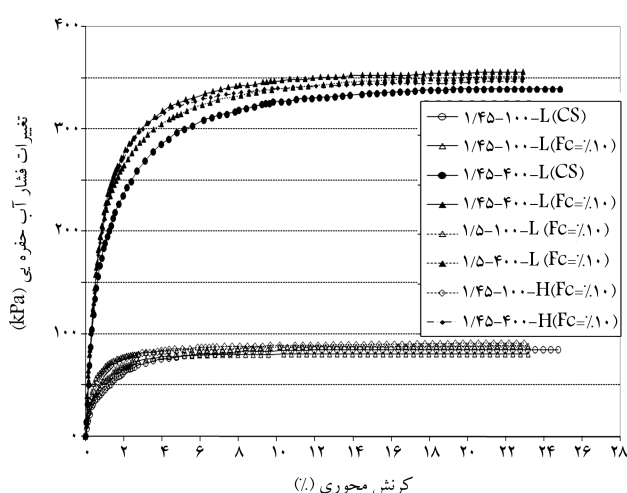
مهم‌تری را نسبت به درصد ریزدانه ایفا کرده است. در این زمینه در بخش ۴.۶. بحث بیشتری خواهد شد.

۳.۶. بررسی تغییرات فشار آب حفره‌یی در حالت پایدار

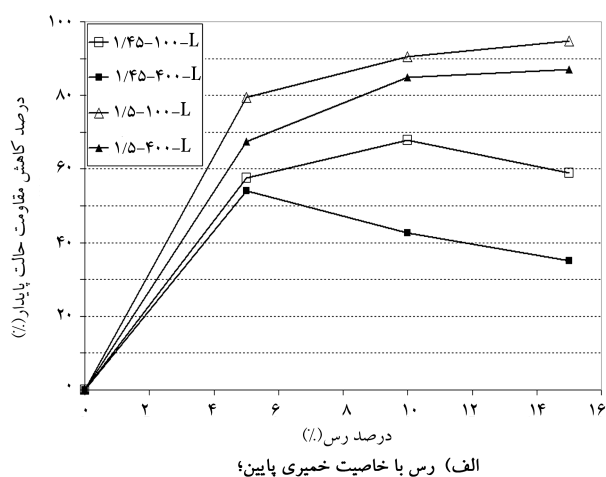
روند تغییرات فشار آب حفره‌یی از مهم‌ترین عواملی است که در تعیین نوع رفتار و نحوه‌ی تغییر شکل ماسه تأثیرگذار است. در شکل ۹ نمودارهایی رسم شده‌اند که نشان‌دهنده‌ی تغییرات فشار آب حفره‌یی در مقابل افزایش کرنش هستند. چنان که مشاهده می‌شود این نمودارها مربوط به نمونه‌های دارای درصد ریزدانه، فشار همه‌جانبه، تراکم و رس‌های با خاصیت خمیری متفاوت‌اند. با مقایسه‌ی نمودارهای مختلف شکل ۹، کاملاً مشخص است که عمده تغییرات فشار آب حفره‌یی مربوط به افزایش فشار همه‌جانبه است و تغییر سایر پارامترهای مورد مطالعه، تأثیر قابل توجهی در تغییرات فشار آب حفره‌یی ندارد.

به‌منظور بررسی بهتر عوامل مؤثر بر تغییرات فشار آب حفره‌یی تا رسیدن به حالت پایدار، در این بخش نمودارهایی رسم شده‌اند که میزان تغییرات فشار آب حفره‌یی در مقابل درصد رس نشان می‌دهند. این تغییرات به صورت تغییر فشار آب حفره‌یی از ابتدای بارگذاری تا رسیدن به حالت پایدار محاسبه و روی محور عمودی نمایش داده شده‌اند. باید توجه کرد که کلیه‌ی این نمودارها برای نمونه‌هایی که دارای رفتار نرم‌شوندگی کامل با کرنش و رسیدن به حالت پایدار بوده‌اند، رسم شده است.

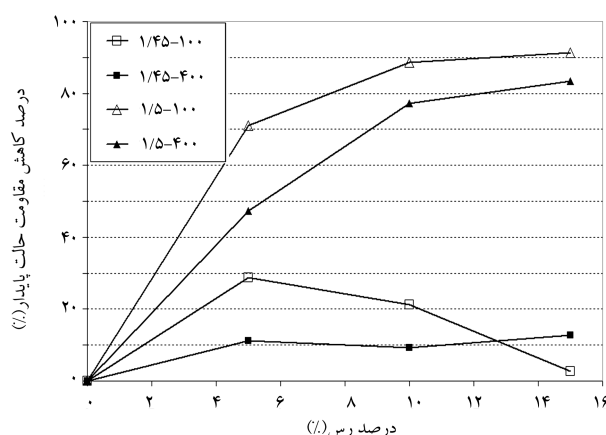
در شکل ۱۰ این تغییرات برای ترکیبات ماسه با رس‌های دارای خاصیت خمیری پایین و بالا رسم شده است. مشاهده می‌شود که نمودارها تقریباً به صورت افقی‌اند و با تغییر درصد رس از خود تغییری نشان نمی‌دهند. با مقایسه‌ی ترکیبات $100-L(H)$ - $17.5-L(H)$ با $17.5-L(H)$ - $40-L(H)$ یا $100-L(H)$ - $17.5-L(H)$ می‌توان به راحتی دریافت که میزان تغییرات فشار آب حفره‌یی تا رسیدن به حالت پایدار تابعی از فشار همه‌جانبه است و با افزایش فشار همه‌جانبه میزان این تغییرات بیشتر می‌شود. می‌توان گفت که میزان این تغییرات تقریباً در حدود میزان فشار مؤثر تحکیمی است. در شکل ۳ نشان داده شد که در نمونه‌های سست و در کرنش‌های بسیار زیاد، تنش انحرافی نمونه بسیار کاهش می‌یابد و مقدار آن تقریباً نزدیک به صفر می‌شود. نتیجه‌ی چنین کاهش‌ی بروز رفتاری بسیار نزدیک به روان‌گرایی کامل یا روان‌گرایی اولیه (تنش انحرافی = صفر) است.



شکل ۹. تغییرات فشار آب حفره‌یی در مقابل افزایش کرنش برای نمونه‌های دارای شرایط گوناگون.



الف) رس با خاصیت خمیری پایین؛



ب) رس با خاصیت خمیری بالا.

شکل ۸. درصد کاهش مقاومت حالت پایدار در مقابل افزایش درصد رس برای ترکیبات ماسه.

کاهش مقاومت حالت پایدار کم‌تر خواهد بود. به عبارت دیگر، مقاومت حالت پایدار ماسه‌هایی که در اعماق بیشتر قرار گرفته‌اند، نسبت به افزایش درصد رس، حساسیت کم‌تری دارد. اکنون چنانچه در شکل ۸ نمودارهای ترکیبات $100-L(H)$ - $17.5-L(H)$ را با $100-L(H)$ - $17.5-L(H)$ یا ترکیب $100-L(H)$ - $17.5-L(H)$ را با $400-L(H)$ - $17.5-L(H)$ مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که نمودارهای مربوط به تراکم بیشتر، بالاتر قرار می‌گیرند که به معنی تأثیرپذیری بیشتر مقاومت حالت پایدار ماسه‌های متراکم‌تر نسبت به افزایش درصد رس است. در بررسی کلی شکل ۸ الف و ب مشاهده می‌شود که عمده تغییرات مقاومت حالت پایدار با افزایش رس تا حدود ۵ درصد است. بعد از ۵ درصد شیب نمودارها کم‌تر شده و حتی در مواردی منفی می‌شود. این امر نشان‌گر کاهش کم‌تر مقاومت‌ها با ادامه افزایش درصد رس است. به نظر می‌رسد که در درصد‌های پایین رس، این درصد رس است که روی رفتار تأثیرگذار است و قرارگیری دانه‌های رسی بین دانه‌های ماسه‌یی منجر به کاهش شدید مقاومت می‌شود. اما با ادامه‌ی افزایش درصد رس به تدریج خاصیت خمیری ترکیب افزایش یافته و نقش مهم‌تری را نسبت به درصد رس ایفا می‌کند. به همین دلیل با رسیدن به درصد‌های بالای رس، بالارفتن خاصیت خمیری ترکیب مانع از کاهش‌های شدید مقاومت می‌شود و حتی در مواردی موجب افزایش مجدد مقاومت هم می‌شود.

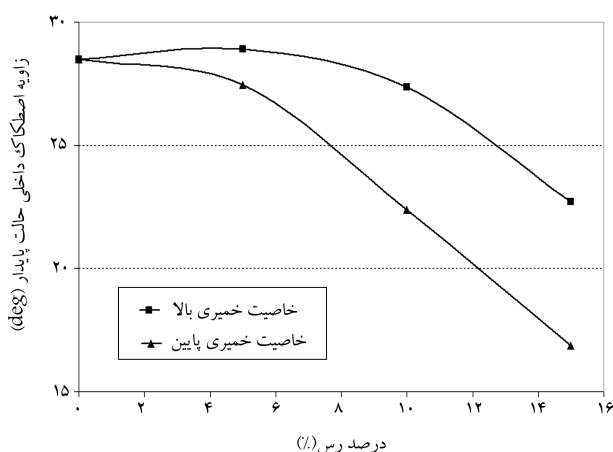
به این ترتیب با افزایش درصد رس، به تدریج خاصیت خمیری ریزدانه نقش

پایدار و مقایسه‌ی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک در ترکیبات ماسه با رس‌های دارای خاصیت خمیری بالا و پایین، نمودارهای تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی حالت پایدار در مقابل درصد رس رسم شده است. باید توجه کرد که میزان تنش برشی حالت پایدار که معمولاً به نام «مقاومت پسماند» خوانده می‌شود و نقش مهمی در تحلیل‌های پایداری و دیگر موارد مرتبط دارد، تا حد زیادی به مقدار زاویه‌ی اصطکاک و میزان قفل‌وبست بین دانه‌ی در حالت پایدار وابسته است. در شکل ۱۱ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک در مقابل افزایش درصد رس برای دو نوع رس با خاصیت خمیری بالا و پایین رسم شده است.

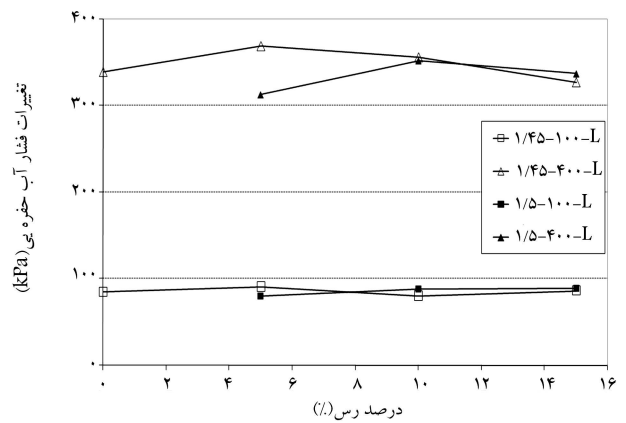
با توجه به نمودارهای شکل ۱۱ کاملاً مشهود است که روند کاهش زاویه‌ی اصطکاک تا ۵ درصد رس تقریباً ناچیز بوده و بعد از آن شدت بیشتری می‌یابد. با افزایش درصد ریزدانه، رس بیشتری بین دانه‌ها قرار می‌گیرد و چون دانه‌ها راحت‌تر روی هم می‌لغزند، در نتیجه زاویه‌ی اصطکاک کاهش بیشتری می‌یابد.

همچنین با مقایسه‌ی نمودارهای مربوط به رس‌های با خاصیت خمیری متفاوت، مشاهده می‌شود که روند کاهش زاویه‌ی اصطکاک تا ۵ درصد رس تقریباً یکی بوده و از ۵ درصد به بعد این نمودارها از هم فاصله می‌گیرند و نمودار مربوط به رس با خاصیت خمیری کم‌تر به مراتب روند کاهشی بیشتری از خود نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های مشابه که با استفاده از رس‌های با خاصیت خمیری بالا و پایین ساخته شده‌اند (تصویر ۲)، و همچنین با مقایسه این تصاویر با تصویر میکروسکوپی از بافت ماسه‌ی تمیز (تصویر ۱)، مشاهده می‌شود که با اضافه شدن رس، دانه‌های ماسه تمایل به اتصال به یکدیگر و تشکیل کلوخه‌های بزرگ و کوچک را دارند. با افزایش خاصیت خمیری کلوخه‌های بیشتر و بزرگ‌تری در بافت نمونه تشکیل شده‌اند که منجر به افزایش اصطکاک بین آنها در حین لغزش روی هم در حالت پایدار می‌شود. علاوه بر این صرف‌نظر از اندازه‌ی کلوخه‌ها، بالاتر بودن خاصیت خمیری ترکیب موجب چسبندگی بیشتر بین ذرات و کلوخه‌ها و در نتیجه سختی بیشتر در حرکت و لغزش آنها بر روی هم می‌شود. مجموعه‌ی این عوامل باعث می‌شود که با افزایش درصد رس، ترکیبات دارای رس با خاصیت خمیری کم‌تر به مراتب روند کاهشی شدیدتری از خود نشان دهند.

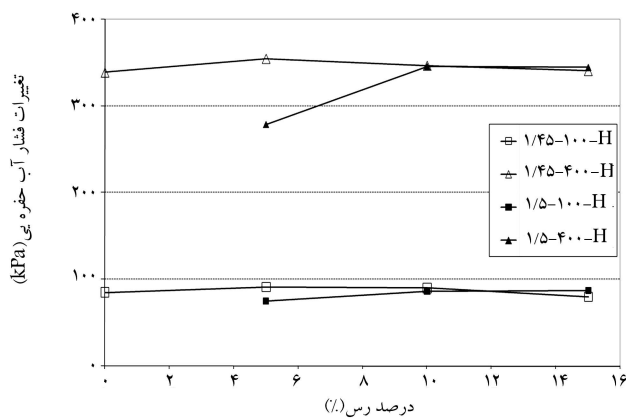
مهم‌ترین نتیجه به دست آمده از این نمودارها آن است که در درصد‌های پایین رس، درصد ریزدانه تعیین‌کننده‌ی رفتار است و لذا نمودارهای مربوط به دو نوع رس با هم تفاوت چندانی ندارند، اما با بالا رفتن درصد رس به تدریج خاصیت



شکل ۱۱. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار در مقابل افزایش درصد رس.



الف) رس با خاصیت خمیری پایین؟



ب) رس با خاصیت خمیری بالا.

شکل ۱۰. تأثیر درصد رس بر تغییرات فشار آب حفره‌ی تا رسیدن به حالت پایدار، برای ترکیبات مختلف ماسه.

در چنین رفتارهایی، چون نمونه بافت اولیه‌ی خود را از دست داده، افزایش فشار همه‌جانبه مستقیماً و به صورت همگن موجب افزایش در فشار آب حفره‌ی خواهد شد. به همین علت در چنین نمونه‌هایی میزان تغییرات فشار آب حفره‌ی تا حد زیادی نزدیک به مقدار فشار همه‌جانبه است.

با مقایسه‌ی ترکیباتی که دارای فشار همه‌جانبه‌ی ثابت و تراکم متفاوت‌اند -- یعنی از مقایسه‌ی ۱/۴۵-۱۰۰-L(H) با ۱/۴۵-۴۰۰-L(H) یا از مقایسه‌ی ۱/۴۵-۴۰۰-L(H) با ۱/۵-۴۰۰-L(H) -- می‌توان دریافت که تراکم نیز تأثیر چندانی بر تغییرات ندارد. نکته‌ی که در نمودارها به چشم می‌خورد این است که ظاهراً میزان تغییرات در ترکیب ماسه با ۵ درصد رس در ترکیبات ۱/۵-۴۰۰ به طرز محسوسی کم‌تر از سایر نقاط است. به نظر می‌رسد که علت این امر خواص اتساعی موجود در ماسه‌ی تمیز در تراکم $1/5 \text{ gr/cm}^3$ بوده است که با افزایش ۵ درصد رس، علی‌رغم تبدیل رفتار به نرم‌شدگی کامل با کرنش، به مقدار کمی موجب کاهش فشار آب حفره‌ی نسبت به سایر ترکیبات شده است. مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۱۱ الف با نمودارهای شکل ۱۰ ب در درصد رس یکسان و در شرایط مشابه تراکم و فشار همه‌جانبه، نشان می‌دهد که خاصیت خمیری رس‌ها نیز تأثیر خاصی بر میزان تغییرات ندارد.

۴.۶. بررسی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار

در این بخش به منظور بررسی تأثیر درصد رس بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی حالت

۷. نتیجه‌گیری

تحقیق انجام شده در راستای بررسی بیشتر پتانسیل روان‌گرایی ماسه‌های رس دار است. برای این منظور بررسی مشخصات رفتاری ترکیبات ماسه با رس‌های دارای خاصیت خمیری مختلف مورد توجه قرار گرفته است. برای رسیدن به این هدف، در حدود ۱۰۰ آزمایش سه‌محوری تحکیم‌بافته‌ی زهکشی‌نشده انجام شده است. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها به‌گونه‌ی بوده است که علاوه بر درصد ریزدانه و خاصیت خمیری آن تأثیر پارامترهایی مثل چگالی و فشار همه‌جانبه نیز مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور علاوه بر استفاده از نمودارهای مناسب برای ارائه‌ی نتایج مطالعات، از تصاویر میکروسکوپی که توسط میکروسکوپ الکترونی از بافت نمونه‌ها تهیه شده است، برای درک بهتر توضیحات کمک گرفته شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده عبارت است از:

با افزایش درصد رس در نسبت تخلخل یا وزن مخصوص خشک ثابت، مقادیر مقاومت بیشینه و مقاومت حالت پایدار در نمودار تنش - کرنش دچار کاهش می‌شوند. با افزایش خاصیت خمیری در یک درصد رس یکسان، مقاومت بیشینه تا حدودی کاهش می‌یابد، در حالی که مقاومت حالت پایدار دچار افزایش می‌شود.

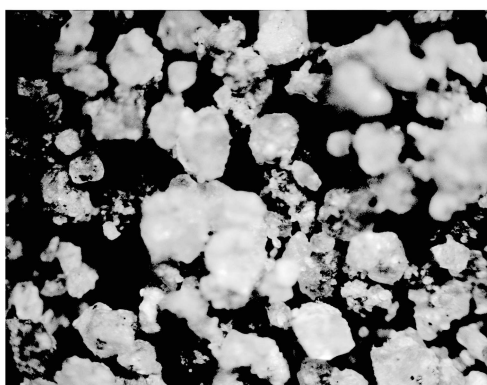
با افزایش فشار همه‌جانبه و تراکم، مقادیر مقاومت بیشینه و مقاومت حالت پایدار افزایش می‌یابد، اما با افزایش درصد رس اثر تراکم کم‌رنگ می‌شود و در درصد‌های بالای رس مقادیر مقاومت مربوط به دو تراکم مختلف با هم تفاوت چندانی ندارند. همچنین نتیجه‌گیری شد که نمونه‌های متراکم‌تر نسبت به افزایش درصد رس حساس‌ترند و افزایش مشابه در درصد رس موجب تغییرات بیشتری در رفتار آنها نسبت به نمونه‌های با تراکم کم‌تر خواهد شد.

مقاومت بیشینه و مقاومت حالت پایدار ماسه‌هایی که در اعماق کم‌تر قرار گرفته‌اند، نسبت به افزایش درصد رس حساس‌تر است، چرا که با افزایش یکسان در درصد رس کاهش بیشتری می‌یابند.

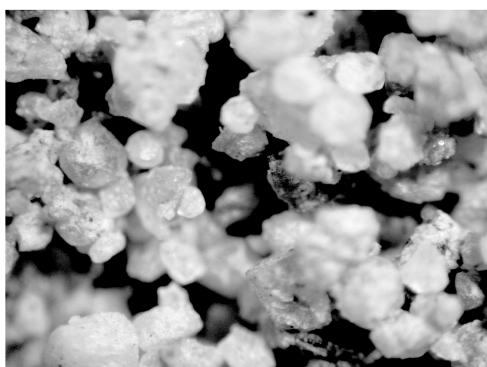
میزان تغییرات فشار آب حفره‌ی تا رسیدن به حالت پایدار (در نمونه‌های با رفتار نرم‌شوندگی کامل با کرنش) تابعی از فشار همه‌جانبه نشان داده است. به نظر می‌رسد که مقدار این پارامتر تا حد زیادی مستقل از درصد رس، تراکم و خاصیت خمیری است.

با افزایش درصد رس تا ۵ درصد، مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی حالت پایدار تغییر چندانی نمی‌کند، اما با ادامه‌ی افزایش درصد رس مقدار آن به شدت کاهش یافته است. در یک درصد رس یکسان، با افزایش خاصیت خمیری مقدار زاویه‌ی اصطکاک نیز به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

عکس‌های گرفته‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داد که افزایش درصد رس موجب قرارگیری دانه‌های رسی بین ذرات ماسه‌ی و همچنین تبدیل آنها به کلوخه‌های بزرگ و کوچک شده است. این امر موجب کاهش شدید مقاومت در ضمن بارگذاری می‌شود. در ترکیبات ماسه با رس‌های با خاصیت خمیری بالاتر، اصطکاک بالاتر بین کلوخه‌ها و همچنین اثر خاصیت خمیری ذرات رسی، موجب می‌شود تا در حالت پایدار میزان مقاومت یا زاویه اصطکاک بالاتری مشاهده شود. با نتایج به دست آمده در مورد درصد تغییرات مقاومت حالت پایدار و همچنین روند تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی، به نظر می‌رسد که در درصد‌های پایین رس این درصد ریزدانه است که تعیین کننده رفتار است، در حالی که با ادامه‌ی افزایش درصد رس و در نتیجه‌ی بالاتر رفتن خاصیت خمیری ترکیب، به تدریج میزان خاصیت خمیری ریزدانه نقش مهم‌تری در تعیین رفتار ایفا خواهد کرد.



الف) عکس میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۵ درصد رس با خاصیت خمیری پایین (MF: ۴۰X-۶X, ۱/۴۵)



ب) عکس میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۵ درصد رس با خاصیت خمیری بالا (MF: ۴۰X-۶X, ۱/۴۵)

تصویر ۲. مقایسه‌ی بافت میکروسکوپی ترکیبات ماسه‌ی تمیز با رس‌های با خاصیت خمیری بالا و پایین.

خمیری نقش مهم‌تری را در تعیین نوع رفتار ایفا می‌کند و لذا نمودارهای مربوط به دو نوع رس از هم فاصله می‌گیرند. این موضوع مشابه نتیجه‌ی است که در بخش ۳.۲.۶ و با بررسی تغییرات مقاومت حالت پایدار به دست آمد. در تحقیقاتی که توسط محققین دیگر نیز انجام شده است، نتایج نسبتاً مشابهی به دست آمده است، به عنوان مثال تأثیر چسبندگی در مواردی که ریزدانه‌ی رسی خاصیت خمیری بیشتری دارد، زیادتر است.^[۲۴]

پلیتو نیز با انجام آزمایش‌های گسترده بر روی ترکیبات ماسه با رس کاتولن (PI=۳۰) و بتونیت (PI=۳۴۰)، نتیجه‌گیری کرد که اهمیت نشانه‌ی خمیری به مراتب بیش از درصد ریزدانه است.^[۲۲] و این نشانه‌ی خمیری کل مصالح است که نقشی اساسی ایفا می‌کند. سایر محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند تا زمانی که نشانه‌ی خمیری مصالح پایین باشد، درصد ریزدانه تعیین‌کننده‌ی نوع رفتار است.^[۲۳] و با افزایش آن مقاومت در مقابل روان‌گرایی کاهش می‌یابد. اما با افزایش نشانه‌ی خمیری مصالح به تدریج از نقش ریزدانه‌ها کاسته شده و نشانه‌ی خمیری مصالح نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. با در نظر گرفتن نتایج این نوشتار و جمع‌بندی نتایج سایر محققین، می‌توان گفت که در درصد‌های پایین رس، درصد ریزدانه بر رفتار تأثیرگذار است، در حالی که با افزایش درصد رس و بالا رفتن خاصیت خمیری ترکیب، به تدریج خاصیت خمیری نقش مهم‌تری در تعیین نوع رفتار ایفا خواهد کرد. با استفاده از رس‌های با خاصیت خمیری بالاتر، به نظر می‌رسد که خاصیت خمیری ترکیب زودتر و بیشتر بر رفتار تأثیرگذار خواهد بود.

پانوشت

1. deaired
2. residual strength

منابع

1. Alarcon Guzman, A., Lwonards, G. and Chameau, J.I. "Undrain monotonic and cyclic strength of sands", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **114**(10), pp. 1089-1109 (1988).
2. Castro, G. "Liquefaction of sands", *Harvard Soil Mechanics Series*, **81**, Cambridge (1969).
3. Ishihara, K. "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, **43**(3), pp. 351-415 (1993).
4. Kramer, S. and Seed, H.B. "Initiation of soil liquefaction under static loading condition", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, **114**(4), pp. 412-430 (1988).
5. Polous S.J. "The steady state of deformation", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, **107**(5), pp. 553-562 (1981).
6. Yoshimi, M., Robertson, P.K. and Wride, C.E. "Undrain shear strength of clean sand to trigger flow liquefaction", *Canadian Geotechnical Journal*, **36**(5), pp. 891-906 (1999).
7. Amini, F. and Qi, G. "Liquefaction testing of stratified silty sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, pp. 208-217 (2000).
8. Kokusho, T. "Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(10), pp. 817-826 (1999).
9. Degregorio, V.B. "Loading systems, sample preparation, and liquefaction", *Journal of GT.ASCE*, **116**(5), pp. 805-821 (1990).
10. Ladd, R.S. "Preparing specimens using under compaction", *ASTM, Geotechnical Testing journal, GT-GODJ*, **1**(1), pp. 16-23 (1978).
11. Mulilis, J.P. et al. "Effect of sample preparation on sand liquefaction", *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, **103**(2), pp. 91-108, (1977).
12. Bouferra, R. and Shahrour, I., *Influence of Fines on the Resistance to Liquefaction of a Clayey Sand*, Laboratoire de Me'canique de Lille, University of Sciences and Technologies of Lille, Polytech Lille, France (2003).
13. Lade, P.V. and Yamamuro, J.A. "Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands", *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, pp. 918-928 (1997).
14. Naeini, S. and Baziar, A. "Effect of fines content on steady state strength of mixed and layered samples of a sand," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal*, **24**, pp. 181-187 (2004).
15. Pitman, T.D., Robertson, P.K. and Sego, D.C. "Influence of fines on the collapse of loose sands", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**, pp. 728-739 (1994).
16. Polito, C. and Martin, J. "Effects of nonplastic fines on the liquefaction of resistance of sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **127** (5) pp. 408-415 (2001).
17. Xenaki, V. and Athanasopoulos, G. "Discussion of effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **129** (4), pp. 387-390 (2003).
18. Yamamuro, J. and Lade, P. "Steady state concepts and static liquefaction of silty sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **124**(9), pp. 868-877 (1998).
19. Chung, K.Y.C. and Wong, I.H. "Liquefaction potential of soils with plastic fines", *Proceeding of soil dynamics and earthquake engineering*, Conf., Southampton, pp. 887-897 (1982).
20. Guo, T. and Prakash, S. "Liquefaction of silt and silt-clay mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125** (8) pp. 706-710 (1999).
21. Koester, J. "Effects of fines type and content on liquefaction potential of low to medium plasticity fine-grained soils", National earthquake conference (1993).
22. Polito, C.P. "The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils", PHD Dissertation (Faculty of the Virginia Polytechnic Institute) (1999).
23. Yasrebi, S.S. "Investigating the effects of content and shapes of fines on steady state behavioural properties of saturated sands to assess liquefaction potential in such soils", Thesis for PhD. Civil Engineering School, Sharif University of Technology (1376).
24. Georgiannou, V.N., Burland, J.B. and Hight, D.W. "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension", *Geotechnique*, **40**(3), pp. 431-449 (1990).
25. Law, K.T. and Ling, Y.H. "Liquefaction of granular soils with noncohesive and cohesive fines", *Proceedings of the tenth world conference on earthquake engineering*, Rotterdam, pp. 1491-1496 (1992).
26. Singh, S. "Liquefaction of silts and silty sands", 11th world conference on earthquake engineering, Elsevier, (1996).
27. Seed, H.B. et al. "Influence of SPT procedures on soil liquefaction resistance evaluations", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **111** (12), pp.1425-1445 (1985).
28. Seed, H.B. and De Alba, P. "Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands", *Proc insitu, ASCE*, **86**, pp. 281-302 (1986).
29. Seed, H.B. and Idriss I.M. "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **97**(SM9), pp. 1249-1273 (1971).
30. Seed, H.B. and Peacock, W.H. "The procedure for measuring soil liquefaction characteristics", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **97**(SM8), pp. 1099-1119 (1971).
31. Bray, J.D. et al. "Sub surface characterization at ground failure sites in adapazari, turkey", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, **130**(7), pp. 673-685 (2004a).
32. Chu, D.B. et al. "Documentation of soil conditions at liquefaction and non liquefaction sites from 1999 chi-chi (Taiwan) earthquake", *Soil Dyn. Earth Quake Engineering*, **24**(9-10), pp. 647-657 (2004).

33. Boulanger, R. and Idriss, I.M. "Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering, ASCE*, **132**(11), pp. 1413-1426 (2006).
34. Bray, J.D. and Sancio, R.B. "Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering, ASCE*, **132**(9), pp. 1165-1176 (2006).
35. Gratchew, I.B et al. "The liquefaction of clayey soils under cyclic loading", *Engineering Geology*, **86**, pp. 70-84 (2006).
36. Ovando-Shelley, E. and Perez, G.B.E. "Undrained behaviour of clayey sands in load controlled triaxial tests", *Geotechnique*, **47**(1), pp. 97-111 (1997).
37. Gratchew, I.B., Sassa, K. and Fukuoka, H. "How reliable is the plasticity index for estimating the liquefaction potential of clayey sands", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering*, **132**(1), pp. 124-127 (2006).
38. Sridharan, A., Rao, O. and Murthy, N.S., "Liquid limit of montmorillonite soils", *Geotech. Test. J.*, **9**(3), pp. 156-159 (1986).
39. Sridharan, A., Rao, O. and Murthy, N.S. "Liquid limit of kaolinitic soils", *Geotechnique*, **38**(2), pp. 191-198 (1988).
40. Seed, H.B. and Idriss, I.M., *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earth Quakes*, EERI monograph, Berkeley, Calif. (1982).
41. Naeemifar, O., *Effects of Fine Content with Different Plasticity Values on Liquefaction Potential of Sands*, Master of Science thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (1385).
42. Jafari, M.K. and Shafiee, A. "Effect of plastic fine on the liquefaction potential of sands", *Bana*, **12-13** (1379).
43. Ovando-Shelley, E. and Mesa, C.M. "Undrained behaviour of a sand containing fines", *Proc. 9th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Fond Eng VinÄa del Mar, Chile*, **3**, pp. 1119±1136. (1991).
44. Gahremani, M. *The Effects of Plastic Fines and Their Plasticity on the Liquefaction Resistance of Saturated Sands*, Master of science thesis, Tehran University, Tehran, Iran (1384).