

# تأثیر درصد و PI رس روی مشخصات سطح مرزی حالت ماسه‌های رس دار

امید نعیمی فر<sup>۱</sup> و سید شهاب‌الدین یثربی\*<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> دانشیار گروه خاک و پی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۴/۰۷، تاریخ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۰/۲۴)

## چکیده

برای ماسه‌های سست سطحی به نام سطح مرزی حالت قابل تعریف است که نمونه بعد از رسیدن به آن ناپایدار می‌شود و می‌تواند از خود رفتارهای جریان‌ی توأم با پدیده‌هایی مثل روانگرایی نشان دهد. در این مطالعه با انجام حدود ۱۰۰ آزمایش سه محوری بر روی ماسه تمیز و ترکیبات آن با رس‌های با پلاستیسیته مختلف، سعی شده است تا ضمن بررسی تغییرات سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی، بررسی جامعی در خصوص تأثیر درصد رس و پلاستیسیته آن روی رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس دار صورت گیرد. نتایج بدست آمده نشان داده است که مشخصات سطح مرزی حالت تا حد زیادی به درصد ریزدانه موجود در ماسه و پلاستیسیته آن بستگی دارد. همچنین با تفسیر تغییرات سطح مرزی حالت، نتایج ارزشمندی در خصوص تأثیر درصد ریزدانه و پلاستیسیته آن بر روی مشخصات رفتاری و پتانسیل روانگرایی ماسه‌های رس دار بدست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** روانگرایی، حالت بحرانی، حالت پایدار، سطح مرزی حالت.

## مقدمه

نتایج تحقیقات مختلف در مورد سطوح حالت بحرانی ماسه‌ها، نشان داده است که یک سطح مرزی حالت در فضای  $(q-p'-e)$  می‌تواند تعریف شود که در بالای آن یک شرط حالت برای یک مصالح خاص مجاز نمی‌باشد در واقع این سطح از یک پوش متشکل از قسمت‌های *post peak* مسیره‌های تنش زهکشی نشده تشکیل می‌شود و هر تلاشی برای گذشتن از آن منجر به فروپاشی و رخداد گسیختگی‌های جریان‌ی برای نمونه‌های ماسه‌ای سست خواهد شد [۸-۱۲].

سطح مرزی حالت واقعی، یک سطح منحنی شکل می‌باشد که از یک سو به خط حالت پایدار ختم می‌شود. اما نتایج ارائه شده توسط Sasitharan و همکارانش در ۱۹۹۴ نشان داده است که این سطح را می‌توان به صورت تقریبی با یک سطح دو بعدی مدل کرد که این امر در شکل ۱ به نمایش در آمده است [۱۳]. در حقیقت آن‌ها با بررسی نتایج آزمایشات بر روی مصالح مختلف مثل نتایج آزمایشات انجام شده توسط ایشیهارا (۱۹۹۱) بر روی ماسه توپورا [۱۲] و یا ماسه اوتاوا [۱۳]، نتیجه‌گیری کردند که قسمت‌های *post peak* منحنی‌های مسیر تنش زهکشی نشده برای هر مصالح خاص می‌توانند توسط خطوطی با شیب برابر تقریب زده شوند. تعداد نامحدودی

تحقیقات مختلف نشان داده است که ماسه‌های شل و اشباع هنگامی که تحت تأثیر لرزش‌های زمین در شرایط زهکشی نشده قرار گیرند، می‌توانند از خود رفتار نرم‌شوندگی با کرنش نشان داده و به یک حالت پایدار دائمی یا موقتی (حالت شبه پایدار) برسند [۱-۴]. منظور از حالت پایدار تغییر شکل برای یک توده خاک حالتی است که در آن توده خاک در حجم ثابت، تنش مؤثر نرمال ثابت، تنش برشی ثابت و سرعت ثابت به صورت پیوسته تغییر شکل می‌دهد [۵]. پورشاسب در ۱۹۸۹ و بین در ۱۹۹۱ نشان دادند که حالت پایدار ایجاد شده در آزمایشات مونوتنیک در حقیقت یک حالت بحرانی می‌باشد که برای یک نسبت تخلخل خاص، ثابت می‌باشد و به مسیر تنش زهکشی شده یا زهکشی نشده بستگی ندارد [۶ و ۷]. کاسترو (۱۹۶۹) نیز ضمن تشریح رفتارهای مختلف ماسه در شرایط گوناگون، نشان داد که چنانچه نقاط مربوط به حالت پایدار (یا شبه پایدار) که از آزمایشات مختلف بدست آمده‌اند، در فضای سه بعدی تنش مؤثر میانگین - تنش انحرافی - نسبت تخلخل رسم شوند، تشکیل خطی را می‌دهند که خط حالت پایدار نام دارد [۱].

هرگونه تغییری در مشخصات این سطح موجب می‌شود تا مشخصات رفتاری خاک نظیر رفتار تنش- کرنش و شکل مسیر تنش دچار تغییر شود.

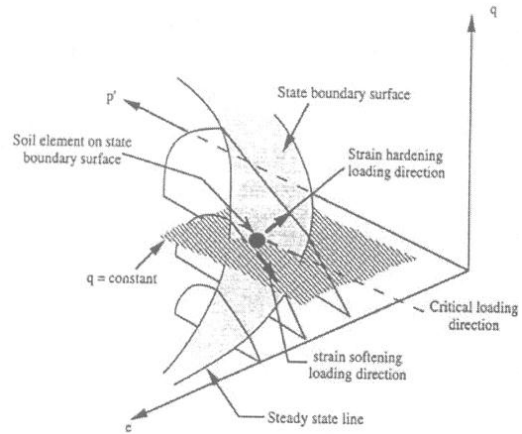
تحقیقاتی که تاکنون در مورد روانگرایی، رفتارهای جریان و به طور کلی رفتار حالت بحرانی ماسه‌ها صورت گرفته‌است، عمدتاً روی ماسه تمیز یا ترکیبات آن با ریزدانه‌های غیر خمیری بوده‌است و مکانیک خاک حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار چندان مورد توجه قرار نگرفته‌است. شاید علت این امر مربوط به این تفکر بوده‌است که وجود خاصیت خمیری در رس مانع از وقوع رفتارهای جریانی و روانگرایی خواهد شد. اما تحقیقاتی که در مورد زلزله‌هایی مثل Northridge 1994، Kokaeli 1999، Chi chi 1999 و یا Niigata 2004 صورت گرفت، نشان داد که در بسیاری از خاک‌هایی که دارای مقادیر قابل توجهی از رس بوده‌اند، نشست‌های محسوسی در خاک ایجاد شده‌است که خسارات زیادی را وارد کرده‌است [۱۴ - ۱۷]. این تحقیقات نشان داد که باید در مورد رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

در این مطالعه ابتدا با استفاده از معادلات ریاضی و به کارگیری پارامترهای مناسب، سطح مرزی حالت ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در فضای سه بعدی تعریف شده‌است. سپس با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده، تأثیر درصد ریزدانه‌های رسی و پلاستیسیته آن‌ها بر روی شکل و مشخصات این سطح مورد بررسی قرار گرفته‌است. در نهایت با تفسیر عملکرد سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی، اثر پارامترهای مختلف بر روی مشخصات رفتاری ماسه‌های رس‌دار در حالت بحرانی مورد تحقیق قرار گرفته‌است.

### مشخصات مصالح

کلیه آزمایش‌های لازم برای این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM انجام شده‌اند. برای مصالح ماسه‌ای مورد استفاده در این آزمایشات از ماسه سیلیسی فیروزکوه (ماسه ۱۶۱) استفاده شده که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) ارائه شده‌است. این مصالح دارای تشابهات زیادی با مصالح معروف مثل ماسه توپورا یا ماسه سنگنیاما می‌باشد و از این لحاظ می‌توان نتایج مربوط به آزمایشات انجام شده روی ماسه ۱۶۱ را تا حدودی با نتایج مربوط به

از این خطوط برای حالت‌های مختلف تنش قابل تعریف است که مجموعه آن‌ها سطح مرزی حالت تقریبی را در فضای سه بعدی تشکیل می‌دهند.



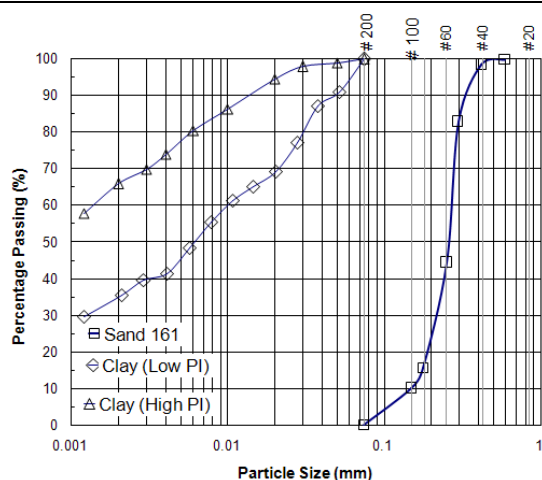
شکل ۱: تقریب ساده از سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی

برای درک بهتر مفهوم و کارکرد سطح مرزی حالت می‌توان المان خاک نشان داده شده در روی سطح مرزی حالت در شکل ۱ را در نظر گرفت.

اگر برای این نمونه خاک، بارگذاری با سرعت بالا و به صورت زهکشی نشده انجام شود، مسیر تنش حاصل شده سطح مرزی حالت را به سمت پایین و به طرف خط حالت پایدار در همان نسبت تخلخل طی می‌کند. بدین ترتیب المان خاک به سمت خط حالت پایدار رفتار نرم‌شوندگی با کرنش نشان می‌دهد.

اکنون چنانچه برای این نمونه سرعت بارگذاری پایین و به صورت زهکشی شده باشد، آنگاه مسیر تنش حاصله در امتداد مرز حالت به سمت حالت پایدار در یک نسبت تخلخل متفاوت حرکت خواهد کرد. در حقیقت در این حالت انهدام ساختاری اسکلت ماسه موجب می‌شود که المان خاک همچنانکه در حجم کاهش می‌یابد، در روی سطح مرزی حالت از خود رفتار سخت‌شوندگی با کرنش نشان دهد. به این ترتیب می‌توان نتیجه‌گیری کرد که سطح مرزی حالت با اجبار نمونه به حرکت در روی خود، شکل مسیر تنش آن را تعیین می‌کند [۱۳].

با جمع‌بندی مطالبی که گفته شد، مشخص می‌شود که مشخصات سطح مرزی حالت در حقیقت تعیین‌کننده مشخصات رفتاری نمونه خاک می‌باشد. به عبارت دیگر



شکل ۲: منحنی های دانه بندی مصالح مورد استفاده

## دستگاه و روش انجام آزمایشات

دستگاه مورد استفاده در آزمایشات، یک دستگاه سه محوری مونوتیک می باشد. قسمت های مختلف این دستگاه توسط سنسورهای با حساسیت بالا تجهیز شده است که با ارتباط آن ها به کامپیوتر امکان ذخیره داده های مورد نیاز و تبدیل آن ها به نمودارهای دلخواه فراهم شده است. سیستم اعمال بار به صورت کنترل کرنش بوده و در این آزمایشات نرخ تغییر شکل ثابت  $0.5 \text{ mm/min}$  بر نمونه اعمال شده است. برای ساخت نمونه های 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 به خوبی مخلوط می شود تا کاملاً همگن شوند. سپس به این ترکیب آب اضافه می شود 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 می شود. نمونه های ساخته شده دارای قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر بوده اند (هرچند روش تراکم مرطوب ممکن است به طور کامل ساختار واقعی خاک در محل را مدل نکند، اما ایشیهارا (۱۹۹۳) و یثربی (۱۳۷۶) نشان دادند که تهیه نمونه به این روش دارای مزایای قابل توجهی می باشد [۹ و ۱۸]. همگنی کامل نمونه در لایه های مختلف، عدم وقوع جداشدگی دانه ها از همدیگر، امکان ساخت نمونه بسیار سست حتی با دانسیته منفی و از جمله این مزایا می باشند (علاوه بر این برای ایجاد همگنی کامل در ساخت نمونه ها، تکنیک های اصلاحی لد (۱۹۷۸) مورد توجه قرار گرفته است [۱۹]).

این ماسه ها مقایسه کرد. مشخصات فیزیکی این ماسه ها نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

مشخصات رس های مورد استفاده در آزمایشات که قسمت عبوری از الک ۲۰۰ آنها مورد استفاده قرار گرفته است، در جدول (۲) ارائه شده است. این دو نوع رس به نحوی انتخاب شده اند که یکی دارای پلاستیسیته پایین و دیگری دارای پلاستیسیته نسبتاً بالا باشد. رس با پلاستیسیته بالا از اطراف شهر قزوین و رس با پلاستیسیته پایین از سایت سد درونگر در استان خراسان بدست آمده است. اضافه کردن این دو نوع رس به ماسه در شرایط یکسان، امکان یک بررسی مناسب در مورد نحوه تأثیر پلاستیسیته روی رفتار نمونه را فراهم کرده است. در شکل (۲) منحنی های دانه بندی مصالح مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروز کوه و مقایسه آن با ماسه های تویورا و سنگنیاما

Toyoura sand	Sengenyama sand	Sand 161	خصوصیات
2.65	2.72	2.66	چگالی ویژه ( $G_s$ )
0.977	0.911	0.928	نسبت تخلخل حداکثر
0.597	0.550	0.583	نسبت تخلخل حداقل
0.17	0.27	0.26	$D_{50}$ (mm)
0.15	0.15	0.15	$D_{10}$ (mm)
0	2.3	0	درصد ریزدانه
1.26	1.93	1.80	ضریب یکنواختی ( $C_U$ )
1.02	1.02	1.14	ضریب خمیدگی ( $C_C$ )

جدول ۲: مشخصات رس های با پلاستیسیته پایین و بالا

$G_s$	شاخص خمیری (PI%)	حد خمیری (PL%)	حد روانی (LL%)	نوع رس
2.64	11	17	28	رس درونگر (پلاستیسیته کم)
2.64	30	25	55	رس قزوین (پلاستیسیته زیاد)

مخصوص خشک ثابت ساخته شده‌اند، دارای نسبت تخلخل ثابتی نیز می‌باشند که در مقایسه نتایج بسیار مفید خواهد بود. نسبت تخلخل نمونه‌های با  $\gamma=1.45 \text{ gr/cm}^3$  و  $\gamma_d=1.50 \text{ gr/cm}^3$  به ترتیب برابر  $0.1828$  و  $0.1767$  می‌باشند.

در این مطالعه هر ترکیب به صورت A-B-C نامگذاری شده‌است که در آن A نشانگر میزان تراکم نمونه، B نشانگر فشار تحکیم مؤثری است که آزمایش در آن انجام شده‌است و حرف C نشانگر نوع رس به کار رفته در ترکیب است. برای رس با پلاستیسیته بالا ( $PI=30\%$ ) از حرف اختصاری H و برای رس دارای پلاستیسیته پایین ( $PI=11\%$ ) از حرف اختصاری L استفاده شده‌است.

در مورد درصد رس نمونه‌ها هرکجا که لازم بوده‌است، مستقیماً به مقدار آن اشاره شده‌است (به عنوان مثال، ترکیب 1.45-400-H، نشان دهنده گروه نمونه‌هایی است که با تراکم  $1/45$  گرم بر سانتیمتر مکعب ساخته و تحت فشار همه جانبه  $400$  کیلوپاسکال تحکیم شده‌اند و برای ساخت آن‌ها از  $0$  تا  $15$  درصد رس با پلاستیسیته بالا استفاده شده‌است).

جدول (۳) و (۴) گروه‌بندی کلی آزمایشات را برای ترکیب‌های مختلف ماسه و رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ۸ ترکیب متفاوت از دانسیته، فشار همه جانبه و نوع رس، آزمایشات بر روی ماسه تمیز و ترکیبات آن با صفر تا  $15$  درصد رس انجام شده‌است. چنین طبقه‌بندی امکان بررسی تأثیر هر پارامتر را زمانی که پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شده‌اند، فراهم کرده‌است.

کلیه آزمایشات به صورت تحکیم یافته - زهکشی نشده انجام شده‌اند. برای اشباع نمونه‌ها ابتدا گاز  $CO_2$  از درون نمونه عبور داده شده و آنگاه آب از هوا خالی شده (Deaired) به آرامی از درون نمونه عبور داده می‌شود. برای رسیدن به اشباع کامل از پس فشاری در حدود  $40$  کیلوپاسکال در آزمایشات استفاده شده‌است. در تمامی آزمایشات رسیدن به مقدار B-Value برابر یا بزرگتر از  $0.97$  به منزله 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.

### برنامه آزمایشات

به طور کلی آزمایشات انجام شده در این مطالعه، شامل ساخت نمونه در دو وزن مخصوص خشک متفاوت بوده‌است که برای حالت سست  $d=1.45 \text{ gr/cm}^3$  و برای حالت با تراکم متوسط  $d=1.5$  ( $Dr=27\%$ ) و برای حالت با تراکم متوسط  $d=1.5$  ( $Dr=45\%$ ) در نظر گرفته شده‌است. این دو مقدار دو نوع رفتار مرتبط با روانگرایی و رفتارهای جریانی، یعنی نرم‌شدگی کامل با کرنش و رفتار حالت شبه پایدار را در ماسه تمیز نشان دادند.

در هر دو مقادیر فوق، آزمایشات بر روی ماسه تمیز و ترکیب آن با  $5$ ،  $10$  و  $15$  درصد رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین انجام شده‌است. علاوه بر این کلیه آزمایشات در دو فشار همه جانبه  $100$  و  $400$  کیلو پاسکال تکرار شده‌اند تا تأثیر فشار همه جانبه هم روی مشخصات رفتاری نمونه‌ها بررسی شود. همچنین مصالح رسی و ماسه‌ای به نحوی انتخاب شده‌اند که علاوه بر تأمین مشخصات مورد نیاز، دارای چگالی ویژه (GS) نزدیک به هم نیز باشند. بدین ترتیب نمونه‌ها علاوه بر اینکه در وزن

جدول ۳: طبقه‌بندی کلی آزمایشات برای ترکیبات ماسه با رس‌های با پلاستیسیته پایین

گروه	آزمایش	ترکیبات	گروه	آزمایش	ترکیبات
گروه ۱: 1.45-100-L	۱	Clean sand	گروه ۳: 1.45-400-L	۹	Clean sand
	۲	Sand+5% clay		۱۰	Sand+5% clay
	۳	Sand+10% clay		۱۱	Sand+10% clay
	۴	Sand+15% clay		۱۲	Sand+15% clay
گروه ۲: 1.5-100-L	۵	Clean sand	گروه ۴: 1.5-400-L	۱۳	Clean sand
	۶	Sand+5% clay		۱۴	Sand+5% clay
	۷	Sand+10% clay		۱۵	Sand+10% clay
	۸	Sand+15% clay		۱۶	Sand+15% clay

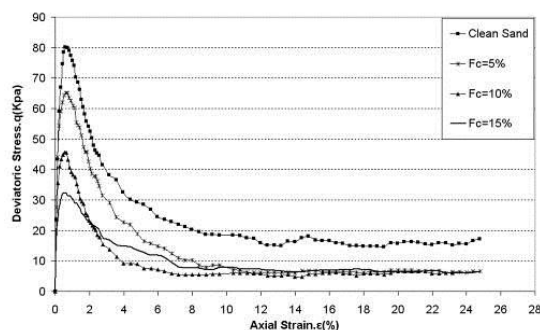
جدول ۴: طبقه‌بندی کلی آزمایشات برای ترکیبات ماسه با رس‌های با پلاستیسیته بالا

گروه	آزمایش	ترکیبات	گروه	آزمایش	ترکیبات
گروه ۵: 1.45-100-H	۱۷	Clean sand	گروه ۷: 1.45-400-H	۲۵	Clean sand
	۱۸	Sand+5% clay		۲۶	Sand+5% clay
	۱۹	Sand+10% clay		۲۷	Sand+10% clay
	۲۰	Sand+15% clay		۲۸	Sand+15% clay
گروه ۶: 1.5-100-H	۲۱	Clean sand	گروه ۸: 1.5-400-H	۲۹	Clean sand
	۲۲	Sand+5% clay		۳۰	Sand+5% clay
	۲۳	Sand+10% clay		۳۱	Sand+10% clay
	۲۴	Sand+15% clay		۳۲	Sand+15% clay

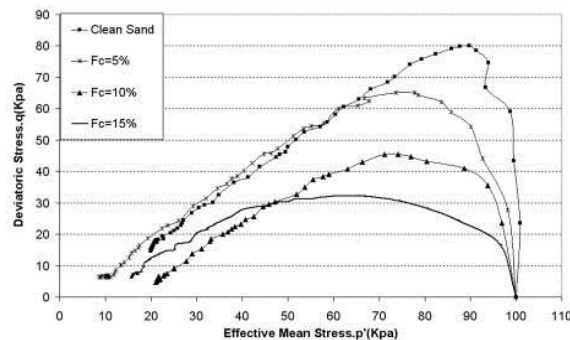
## نتایج

از آن‌ها استخراج شده‌است و برای بررسی وجود سطح مرزی حالت، به دست آوردن پارامترهای لازم برای تعریف آن و همچنین بررسی سایر موارد مورد بحث در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌است. اطلاعات بیشتر و نتایج کامل مربوط به آزمایشات انجام شده بر روی ترکیبات مختلف سایر گروه‌ها، توسط نعیمی فر [۲۰] ارائه شده‌است.

در شکل ۳ نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده بر روی ترکیبات مختلف گروه 1.45-100-L که دارای درصد‌های مختلف رس می‌باشند، نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نتایج به صورت نمودارهای مسیر تنش و تغییرات تنش تفاضلی در مقابل کرنش، ارائه شده‌اند. در ادامه به جای ارائه مستقیم نمودارهای تنش-کرنش یا مسیر تنش، اطلاعات مورد نیاز



الف) نمودارهای تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری



ب) نمودارهای مسیر تنش

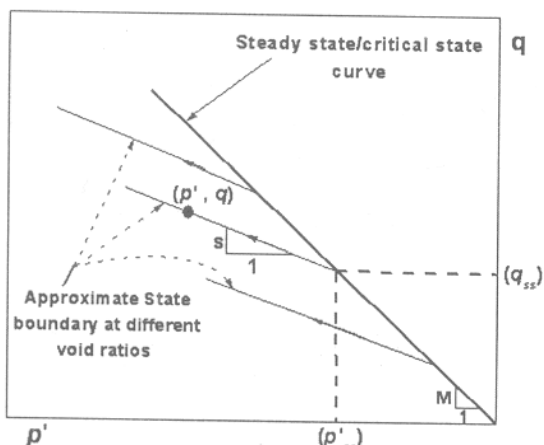
شکل ۳: نتایج مربوط به ترکیبات 1.45-100-L در درصد‌های مختلف رس

کلیه پارامترهای لازم برای تعریف این سطح در فضای سه بعدی معرفی و مقادیر آن‌ها با استفاده از آزمایشات انجام شده به دست آورده شده‌اند. در مرحله بعدی با بررسی تأثیر درصد ریزدانه و پلاستیسیته آن بر روی پارامترهای تعریف کننده این سطح بحرانی، تلاش شده‌است تا تحقیق جامعی در خصوص تأثیر درصد ریزدانه

## بررسی سطح مرزی حالت ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ترکیبات آن با رس‌های با پلاستیسیته مختلف

در این مطالعه ابتدا وجود سطح مرزی حالت و نحوه تعریف آن برای ماسه ۱۶۱ فیروزکوه مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای این منظور با استفاده از معادلات ریاضی،

$$q = sp' + (M - s)p'_{ss} \quad (۳)$$



شکل ۴: موقعیت خطوط تقریبی سطح مرزی حالت نسبت به خط حالت پایدار

اکنون به منظور تعریف کامل معادله فوق در فضای سه بعدی، تنها لازم است تا نسبت تخلخل در فرمول فوق وارد شود. برای این منظور می‌توان از معادلات خطوط حالت پایدار در صفحه  $e - \ln(p'_{ss})$  برای ایجاد رابطه‌ای بین  $e$  و  $p'_{ss}$  کمک گرفت. در ادامه با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده، خطوط حالت پایدار برای ترکیبات مختلف ماسه با رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین به دست آورده شده و در شکل ۵ ارائه شده‌است.

با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای خط حالت پایدار هر ترکیب می‌توان رابطه‌ای بین  $e$  و  $p'_{ss}$  در نظر گرفت. چنانچه  $p'_{ss}$  در مقیاس لگاریتمی در نظر گرفته شود، آنگاه معادله بهترین برازش خطی که این دو پارامتر را به هم ربط می‌دهد، می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$e = \Gamma - \lambda \ln p'_{ss} \quad (۴)$$

رابطه فوق می‌تواند به صورت زیر هم نوشته شود:

$$p'_{ss} = \exp\left(\frac{\Gamma - e}{\lambda}\right) \quad (۵)$$

با جایگزینی معادله ۵ در رابطه ۳، معادله سطح مرزی حالت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$q = sp' + (M - s) \exp\left(\frac{\Gamma - e}{\lambda}\right) \quad (۶)$$

و پلاستیسیته آن بر روی شکل و خصوصیات سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی صورت گیرد. بدین ترتیب امکان بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مشخصات رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار، مانند شکل مسیر تنش، رفتار تنش- کرنش، مقادیر مقاومت‌ها، پتانسیل روانگرایی و سایر مشخصات رفتاری آن‌ها فراهم شده‌است.

### ۱- تعریف ریاضی سطح مرزی حالت

برای آنکه بتوانیم سطح مرزی حالت را برای مصالح مختلف تعیین کنیم، قبل از هر چیز لازم است تا تعریف ریاضی مشخصی از سطح مرزی حالت انجام شود. همان‌طور که گفته شد، نتایج ارائه شده توسط Sasitharan و همکارانش در ۱۹۹۴ نشان داده‌است که قسمت‌های بعد از تنش برشی حداکثر در منحنی‌های مسیر تنش زهکشی نشده برای هر مصالح خاص، می‌توانند توسط خطوطی با شیب برابر تقریب زده شوند. با این کار، امکان مدل‌سازی سطح مرزی حالت به صورت یک صفحه دو بعدی و به دست آوردن معادله ریاضی برای آن در فضای سه بعدی ممکن خواهد بود. به این ترتیب در گام اول لازم است تا قسمت‌هایی از مسیر تنش نمونه‌ها که بعد از تنش برشی حداکثر واقع شده‌اند، توسط خطوطی با شیب برابر تقریب زده شوند. این شیب با پارامتر  $S$  نامگذاری خواهد شد. با استفاده از شکل (۴) می‌توان موقعیت این خطوط را نسبت به خط حالت پایدار، در صفحه  $q - p'$  تصویر کرد.

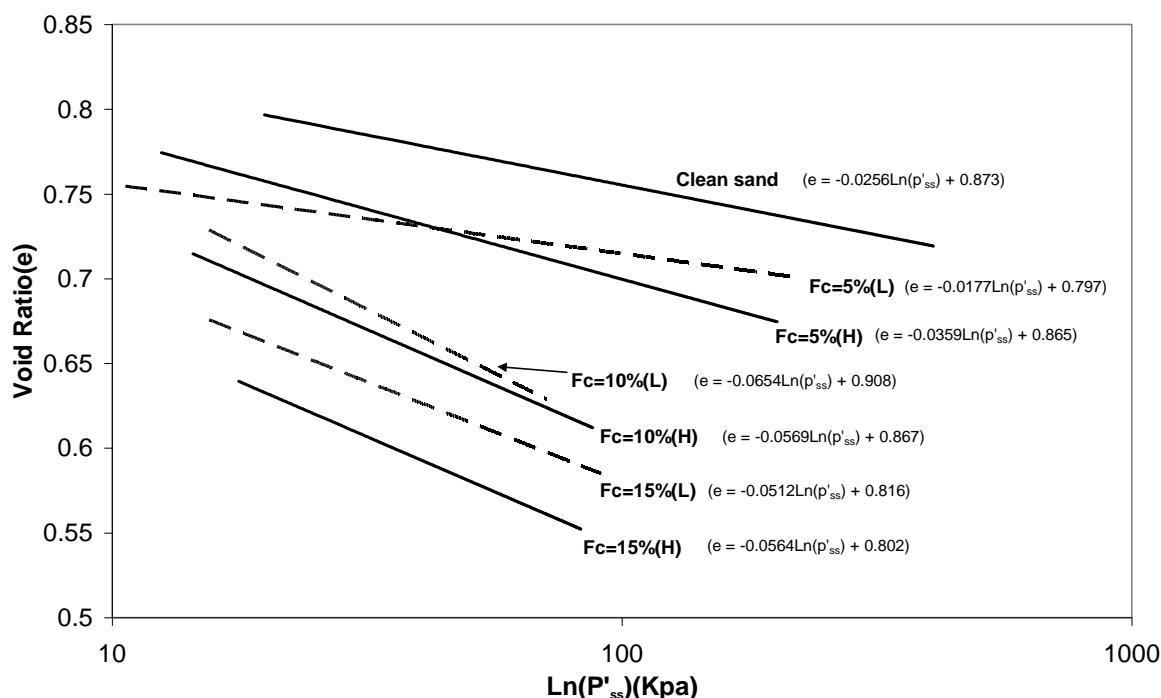
با توجه به شکل (۴) اگر یک وضعیت تنش دلخواه را در روی سطح مرزی حالت با پارامترهای  $p'$  و  $q$  در نظر بگیریم، می‌توان شیب  $S$  را به صورت زیر تعریف کرد:

$$S = \frac{q - q_{ss}}{p' - p'_{ss}} \quad (۱)$$

با مرتب کردن رابطه فوق داریم:

$$q = sp' - sp'_{ss} + q_{ss} \quad (۲)$$

چنانچه نسبت  $\frac{q_{ss}}{p'_{ss}}$  را برابر با پارامتر  $M$  در نظر بگیریم، با جایگذاری آن در فرمول فوق و مرتب کردن آن داریم:



شکل ۵: خطوط حالت پایدار مربوط به ماسه و ترکیبات آن با رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین در فضای نیمه لگاریتمی

جدول ۵: نتایج تعیین پارامتر S برای ترکیبات مختلف ماسه با رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین

S	نام ترکیب
1.02	CLEAN SAND
0.99	SAND+5%CLAY (L)
0.81	SAND+10%CLAY (L)
0.61	SAND+15%CLAY (L)
0.86	SAND+5%CLAY (H)
0.77	SAND+10%CLAY (H)
0.65	SAND+15%CLAY (H)

## ۲-۲- اندازه گیری پارامتر M

به دست آوردن پارامتر  $M = \frac{q_{ss}}{P_{ss}}$  با اندازه گیری شیب بهترین خط گذرنده از نقاط حالت پایدار در نمودار تغییرات  $q_{ss}$  در مقابل  $P'_{ss}$  امکان پذیر است. در این مطالعه این کار برای تمامی ترکیبات صورت گرفته و نتایج آن در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین نمونه‌ای از نحوه تعیین پارامتر M در شکل (۷) نشان داده شده است. از روی این نمودارها نسبت  $M = \left(\frac{q}{P}\right)_{SS}$  برای هر ترکیب به دست آمده است که در حقیقت برابر شیب خط حالت

در رابطه ۶، پارامترهای  $S^*$  و  $M$  و  $\Gamma$  ثابت هستند و همان‌طور که توضیح داده شد، با انجام آزمایشات زهکشی نشده بر روی ماسه شل قابل به دست آوردن می‌باشند. در بخش بعدی، پارامترهای لازم برای تعریف سطوح مرزی حالت ماسه و ترکیبات مختلف آن با رس به صورت کامل به دست آورده شده‌اند. با داشتن این پارامترها، سطح مرزی حالت هر مصالح معین قابل تعریف است.

## ۲- بدست آوردن پارامترهای لازم برای تعریف

### سطح مرزی حالت

#### ۲-۱- محاسبه پارامتر S

برای به دست آوردن S باید شیب بهترین خط مستقیمی که با آن بتوان قسمت بعد از تنش حداکثر را در منحنی مسیر تنش به صورت تقریبی مدل کرد، به دست آورد. در این مطالعه این کار برای همه مسیرهای تنش ترکیبات مورد مطالعه انجام و مقادیر پارامتر S به دست آمده در جدول (۵) ارائه شده است. همچنین نمونه‌ای از نحوه تعیین پارامتر S در شکل (۶) نشان داده شده است.

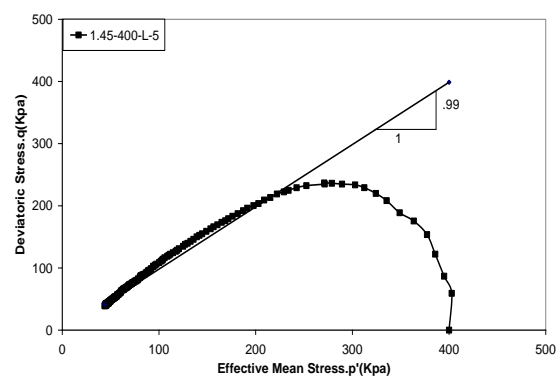
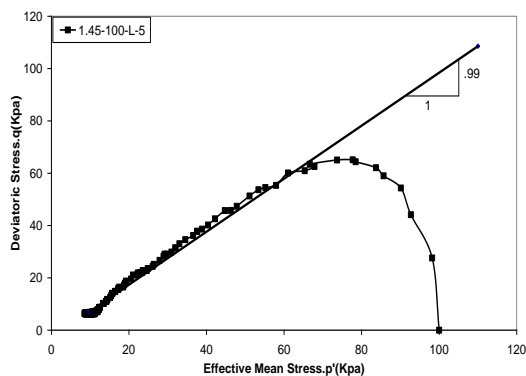
پایدار در فضای  $q-p'$  نیز می‌باشد. علاوه بر این با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی در حالت پایدار به صورت مستقیم از روی نسبت  $M = \left(\frac{q}{p}\right)_{SS}$  به دست می‌آید (رابطه ۷)، می‌توان از نتایج به دست آمده در این قسمت برای بررسی نرخ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در حالت پایدار نیز استفاده کرد.

(باید توجه کرد که میزان تنش برشی حالت پایدار که معمولاً به نام مقاومت پس ماند (Residual Strength) خوانده می‌شود و نقش مهمی را در آنالیزهای پایداری و سایر موارد مرتبط ایفا می‌کند، تا حد زیادی وابسته به مقدار زاویه اصطکاک و میزان قفل و بست بین دانه‌های در حالت پایدار می‌باشد)

با استفاده از رابطه (۷) زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار برای کلیه ترکیبات محاسبه و مقادیر آن نیز در جدول (۶) ارائه شده‌است.

پایدار در فضای  $q-p'$  نیز می‌باشد. علاوه بر این با توجه به اینکه زاویه اصطکاک داخلی در حالت پایدار به صورت مستقیم از روی نسبت  $M = \left(\frac{q}{p}\right)_{SS}$  به دست می‌آید (رابطه ۷)، می‌توان از نتایج به دست آمده در این قسمت برای بررسی نرخ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در حالت پایدار نیز استفاده کرد.

$$\sin \varphi_{ss} = \frac{3\left(\frac{q}{p}\right)_{SS}}{6 + \left(\frac{q}{p}\right)_{SS}} = \frac{3M}{6 + M} \quad (7)$$



الف) ترکیبات ماسه تمیز با ۵ درصد رس با پلاستیسیته پایین

شکل ۶: نمونه‌ای از نحوه تعیین پارامتر S

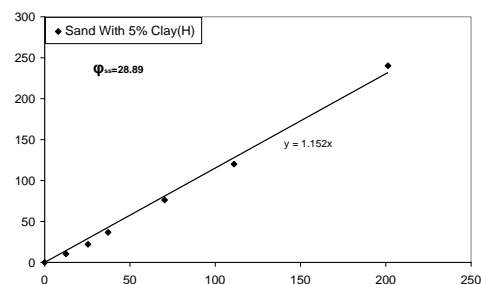
۲-۳- اندازه گیری پارامترهای  $\Gamma$  و  $\lambda$  با توجه به معادلات ارائه شده برای خطوط حالت پایدار ترکیبات مختلف در شکل ۵، مقادیر پارامترهای  $\Gamma$  و  $\lambda$  برای هر ترکیب استخراج و در جدول ۷ ارائه شده‌است:

جدول ۷: پارامترهای  $\Gamma$  و  $\lambda$  که از معادلات خطوط حالت پایدار استخراج شده‌اند

$\Gamma$	$\lambda$	نام ترکیب
0.873	0.0256	CLEAN SAND
0.797	0.0177	SAND+5% CLAY (L)
0.908	0.0654	SAND+10% CLAY (L)
0.816	0.0512	SAND+15% CLAY (L)
0.865	0.0359	SAND+5% CLAY (H)
0.867	0.0569	SAND+10% CLAY (H)
0.802	0.0564	SAND+15% CLAY (H)

جدول ۶: پارامتر M و زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار برای ماسه تمیز و ترکیبات آن با رس

$\varphi_{ss}$ (deg)	$M = \left(\frac{q}{p'}\right)_{SS}$	نام ترکیب
28.5	1.135	CLEAN SAND
27.44	1.089	SAND+5% CLAY (LOW PI)
22.38	0.872	SAND+10% CLAY (LOW PI)
16.86	0.643	SAND+15% CLAY (LOW PI)
28.89	1.152	SAND+5% CLAY (HIGH PI)
27.35	1.085	SAND+10% CLAY (HIGH PI)
22.71	0.886	SAND+15% CLAY (HIGH PI)



شکل ۷: نمونه‌ای از نحوه تعیین پارامتر M (برای ترکیبات ماسه تمیز با ۵ درصد رس با پلاستیسیته بالا)



نشده کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر شکل‌پذیری ترکیباتی بیشتر است که دارای رس بیشتر و یا دارای رس با پلاستیسیته بالاتر باشند. درخشندی (۱۳۸۵) نیز در تحقیقات خود با استفاده از آزمایشات استاتیکی نتیجه گیری کرده‌است که ترکیبات ماسه تمیز و یا دارای ۱۰ درصد کائولینیت بیشتر رفتار شبیه ماسه (SandLike) دارند، اما ترکیبات دارای درصد رس بیشتر، مانند ترکیبات حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد کائولینیت، رفتار رس مانند (Clay like) دارند و لذا شکل‌پذیری آنها بیشتر خواهد شد [۲۱].

۲- مشاهده می‌شود که پارامتر  $M$  با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد، اما افزایش پلاستیسیته در درصد رس ثابت موجب افزایش مقدار آن می‌شود. کاهش این پارامتر به معنی کاهش شیب خط حالت پایدار در صفحه  $q-p'$  و در نتیجه کاهش ارتفاع خط حالت پایدار در فضای سه بعدی نسبت به صفحه  $e-p'_{ss}$  می‌باشد. این موضوع موجب برخورد مسیر تنش نمونه‌ها با خط حالت پایدار در ارتفاع کمتری از صفحه  $e-p'$  و در نتیجه کاهش مقدار مقاومت حالت پایدار خواهد شد. به این ترتیب افزایش درصد رس موجب کاهش مقدار مقاومت حالت پایدار خواهد شد، اما در یک درصد رس ثابت ترکیبات ماسه با رس دارای پلاستیسیته بیشتر، مقاومت حالت پایدار بالاتری را نتیجه خواهند داد. درخشندی (۱۳۸۵) در تحقیقاتی که بر روی ترکیبات ماسه و رس کائولن انجام داده‌است، به طور مشابه نتیجه‌گیری کرده‌است که با افزایش درصد رس تا حدود ۲۰ درصد مقاومت نقطه اوج و مقاومت حالت پایدار کاهش می‌یابد، ضمن آنکه فشار آب حفره‌ای از مقادیر منفی در ماسه‌های تمیز به مقادیر مثبت در ماسه دارای ۲۰ درصد رس تبدیل می‌شود. وی همچنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش درصد رس به بیش از ۲۰ درصد، این روند حالت معکوس پیدا کرده، به طوری که فشار آب حفره‌ای تولید شده مجدداً کاهش پیدا می‌کند [۲۱].

بوفرا و شهرور (۲۰۰۳) کاهش در مقاومت حالت پایدار را با افزایش درصد رس تا حدود ۱۵ درصد نتیجه‌گیری کرده‌اند، در حالی که با افزایش بیشتر درصد رس این روند معکوس شده‌است [۲۲].

جرجیانپو (۱۹۹۰) نتایج مشابهی را در مورد کاهش مقاومت حالت پایدار بر اثر افزایش درصد رس کائولینیت

### ۳- ترکیب پارامترهای به دست آمده و معرفی سطح مرزی حالت ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

در این بخش همه پارامترهای لازم برای تعریف سطح مرزی حالت، که در بخش‌های قبلی به دست آورده شدند، در جدول ۸ گردآوری شده‌اند. با داشتن این پارامترها می‌توان سطح مرزی حالت را برای ماسه ۱۶۱ و کلیه ترکیبات آن با رس‌های دارای PI بالا و پایین تعریف کرد. به عنوان مثال سطح مرزی حالت ماسه ۱۶۱ می‌توان با معادله زیر در فضای سه بعدی تعریف کرد:

$$q = 1.02 p' + 0.115 \exp\left(\frac{0.873 - e}{0.0256}\right) \quad (8)$$

جدول ۸: پارامترهای لازم برای تعریف سطح مرزی حالت ماسه ۱۶۱ و ترکیبات آن با رس‌های مختلف

نام ترکیب	S	M	$\lambda$	$\Gamma$
CLEAN SAND	1.02	1.135	0.0256	0.873
SAND+5%CLAY (L)	0.99	1.089	0.0177	0.797
SAND+10%CLAY (L)	0.81	0.872	0.0654	0.908
SAND+15%CLAY (L)	0.61	0.643	0.0512	0.816
SAND+5%CLAY (H)	0.86	1.152	0.0359	0.865
SAND+10%CLAY (H)	0.77	1.085	0.0569	0.867
SAND+15%CLAY (H)	0.65	0.886	0.0564	0.802

### ۴- تفسیر نتایج بدست آمده از تغییرات شکل و مشخصات سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی

بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده و با بررسی تغییرات پارامترها در جدول ۸، نتایج زیر به دست می‌آید:

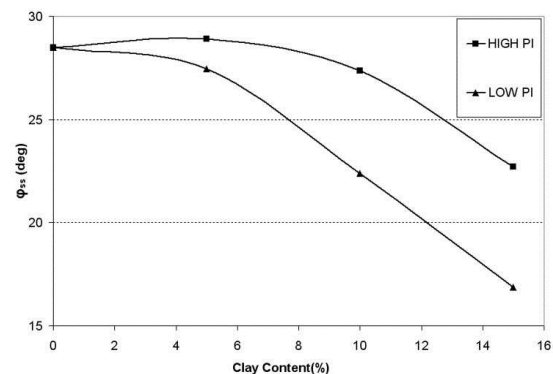
۱- مشاهده می‌شود که شیب سطح مرزی حالت (پارامتر S) با افزایش درصد رس و پلاستیسیته آن کاهش می‌یابد. این موضوع نشانگر مسطح‌تر شدن این سطح در فضای سه بعدی و در نتیجه کاهش نرخ نزولی تنش تفاضلی در کرنش‌های بعد از نقطه اوج می‌باشد. در نتیجه با افزایش درصد رس یا پلاستیسیته آن در وزن مخصوص خشک ثابت یا در نسبت تخلخل ثابت، شکنندگی زهکشی

با مقایسه نمودارهای مربوط به رس‌های با PI متفاوت، مشاهده می‌شود که روند کاهش تا ۵ درصد تقریباً یکی بوده و از ۵ درصد به بعد این نمودارها از هم فاصله می‌گیرند و نمودار مربوط به رس با پلاستیسیته کمتر به مراتب روند کاهش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. با مقایسه تصاویر میکروسکوپی بافت ماسه تمیز با ماسه رس‌دار (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 PI کلوخه‌های بیشتر و بزرگتری در بافت نمونه تشکیل خواهد شد که منجر به افزایش اصطکاک بین آنها در حین لغزش روی هم در حالت پایدار می‌شود. علاوه بر این صرف‌نظر از اندازه کلوخه‌ها، بالاتر بودن PI ترکیب موجب چسبندگی بیشتر بین ذرات و کلوخه‌ها و در نتیجه سختی بیشتر در حرکت و لغزش آنها بر روی هم می‌شود. به همین جهت می‌باشد که افزایش پلاستیسیته رس در ترکیبات دارای درصد رس مشابه موجب افزایش مقاومت حالت پایدار و همچنین زاویه اصطکاک می‌شود.

مهمترین نتیجه به دست آمده از این نمودار آن است که در درصد‌های پایین رس، درصد ریزدانه تعیین کننده رفتار است و لذا نمودارهای مربوط به دو نوع رس با هم تفاوت چندانی ندارند، اما با بالا رفتن درصد رس به تدریج پلاستیسیته نقش مهمتری را در تعیین نوع رفتار ایفا می‌کند و لذا نمودارهای مربوط به دو نوع رس از هم فاصله می‌گیرند.

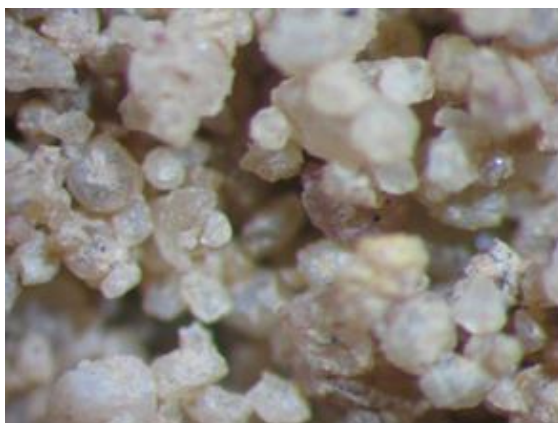
(PI=30%) تا ۷ درصد گزارش کرده‌است [۲۳]. همچنین شلی و پرز (۱۹۹۷) نتایج مشابهی را با استفاده از رس با شاخص خمیری حدود ۱۰ درصد به دست آورده‌اند [۲۴].

۳- با توجه به ارتباط مستقیم پارامتر M با زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار و با استفاده از نتایج جدول (۶)، تغییرات زاویه اصطکاک در مقابل افزایش درصد رس برای دو نوع رس با پلاستیسیته بالا و پایین در شکل ۸ رسم شده‌است.



شکل ۸: تغییرات زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار در مقابل افزایش درصد رس

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد رس مقدار زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار کاهش می‌یابد. اصولاً با افزایش درصد ریزدانه، رس بیشتری بین دانه‌ها قرار گرفته و لذا دانه‌ها راحت‌تر روی هم می‌لغزند و در نتیجه زاویه اصطکاک کاهش بیشتری می‌یابد.



ب) عکس میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۵ درصد رس با پلاستیسیته بالا (MF:40X-6X,1.45)



الف) عکس میکروسکوپی ماسه تمیز (MF:40X-6X,1.45)

تصویر ۱: مقایسه بافت میکروسکوپی ماسه تمیز با ماسه رس‌دار

مهمترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:  
- سطح مرزی حالت برای ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ترکیبات آن با رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین تعریف شد و پارامترهای تعریف کننده این سطوح در فضای سه بعدی، با کمک آزمایشات سه محوری انجام شده به دست آورده شدند.

- با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای تعریف کننده سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی، نتیجه گیری شد که با افزایش درصد رس مقدار مقاومت و زاویه اصطکاک داخلی در حالت پایدار کاهش می‌یابد، در حالی که افزایش پلاستیسیته در درصد رس ثابت، مقدار مقاومت حالت پایدار و زاویه اصطکاک بیشتری را نتیجه خواهد داد. همچنین افزایش درصد رس و پلاستیسیته آن موجب کاهش شیب سطح مرزی حالت (S) و در نتیجه افزایش شکل پذیری ترکیب خواهد شد.

- با در نظر گرفتن تغییرات خطوط حالت پایدار در صفحه  $e-p'$  مشخص شد که با افزایش درصد رس یا پلاستیسیته آن در نسبت تخلخل ثابت یا در وزن مخصوص خشک ثابت، پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها افزایش می‌یابد.

- با جمع بندی نتایجی که در مورد خطوط حالت پایدار و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی حالت پایدار به دست آمد، مشخص شد که در درصد‌های پایین رس، این درصد ریزدانه است که تعیین کننده نوع رفتار است و پلاستیسیته آن تأثیر چندانی ندارد. اما با افزایش درصد رس و بالا رفتن پلاستیسیته ترکیب، به تدریج پلاستیسیته نقش مهمتری را در تعیین نوع رفتار ایفا می‌کند.

### تشکر و قدردانی

از خانم مهندس ساره محمودی، آقای مهندس محمد حسین توکل و آقای مهندس سید حسن مدنی به خاطر زحمات ایشان در طول این مطالعه تشکر و قدردانی می‌شود.

۴- بر اساس تحقیقات گذشته، حرکت خطوط حالت پایدار به سمت پایین (در فضای  $e-Ln p'ss$ ) نشان دهنده افزایش پتانسیل روانگرایی می‌باشد [۱، ۱۰ و ۲۵]. به عبارت دیگر افزایش درصد رس یا افزایش پلاستیسیته آن در وزن مخصوص خشک ثابت یا در نسبت تخلخل ثابت، موجب افزایش پتانسیل روانگرایی ماسه و احتمال رخداد رفتارهای جریانی در آن خواهد شد. درخشندی (۱۳۸۵) نیز بر اساس نتایج آزمایشات سه محوری سیکلیک که بر روی ترکیبات ماسه و رس کائولن انجام شده، نتیجه‌گیری کرده‌است که با افزایش درصد رس تا حدود ۲۰ درصد تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی کاهش می‌یابد، در حالی که بعد از ۲۰ درصد احتمال رخداد روانگرایی به شدت کاهش می‌یابد [۲۱].

چنانچه در شکل (۵) خطوط حالت پایدار مربوط به ترکیبات ماسه با رس‌های مختلف را در درصد رس مشابه مقایسه کنیم، مشاهده می‌شود که در درصد‌های پایین ریزدانه خطوط حالت پایدار ترکیبات ماسه با رس‌های مختلف با هم تفاوت چندانی ندارند، اما با افزایش درصد رس این خطوط از هم فاصله می‌گیرند. به عبارت دیگر در درصد‌های پایین رس، درصد ریزدانه تعیین کننده نوع رفتار می‌باشد، اما با افزایش درصد ریزدانه و بالا رفتن پلاستیسیته ترکیب به تدریج تأثیر پلاستیسیته ریزدانه در تعیین نوع رفتار بیشتر خواهد شد. قهرمانی (۱۳۸۴) نیز نتیجه‌گیری کرده‌است که تأثیر چسبندگی در مواردی که ریزدانه رسی پلاستیسیته بیشتری دارد زیادتر است [۲۶].

پلیتو (۱۹۹۹) نیز با انجام آزمایشات گسترده بر روی ترکیبات ماسه با رس کائولن ( $PI=30$ ) و بنتونیت ( $PI=340$ )، نتیجه‌گیری کرد که اهمیت نشانه خمیری به مراتب بیش از درصد ریزدانه است و این نشانه خمیری کل مصالح است که نقش اساسی را ایفا می‌کند [۲۷].

### جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه با انجام حدود ۱۰۰ آزمایش سه محوری بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و ترکیبات آن با رس‌های با پلاستیسیته بالا و پایین، تلاش شده‌است تا تأثیر درصد ریزدانه و پلاستیسیته آن بر روی مشخصات سطح مرزی حالت در فضای سه بعدی و همچنین رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار، مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

1. Castro,G.(1969); "Liquefaction of sands "Harvard Soil Mechanics Series , No.81 ,Cambridge.
2. Ishihara,K.,(1993); "Liquefaction and flow failure during earthquakes " Geotechnique,VOL43,No.3,351-415.
3. Kramer,S and Seed,H.B.,(1988); "Initiation of soil liquefaction under static loading condition " Journal Of Geotechnical Eng .ASCE,VOL.114.No4,pp.412-430.
4. Yoshimi,M.,Robertson,P.K.,and Wride,C,E (1999); "Undrain shear strength of clean sand to trigger flow liquefaction " Canadian Geotechnical Journal , VOL36 , No5, pp891-906.
5. Polous S.J.,(1981); "The steady state of deformation" Journal Of Geotechnical Eng . ,ASCE,VOL107,No5,pp553-562.
6. Been,G.,Jefferies,M.G.,Hachey,J.(1991); "The critical state of sands" Geotechnique VOL.41, No. 3,pp365-381.
7. poorooshab, H. B. (1989); "description of flow of sand using state parameters" Journal of Computers and Geotechnics, Vol 8, pp 195-218.
8. Sladen,J.A.,D 'hollander,RD.and Krahn,J.(1985); "The liquefaction of sands, a Collapse surface approach" Canadian Geotechnical Journal,VOL22,pp564-578.
9. Ishihara,K.,(1993); "Liquefaction and flow failure during earthquakes " Geotechnique,VOL43,No.3,351-415.
10. Alarcon-Guzman,A.,Lwonards,G.,Chameau,J.I.(1988); "Undrain monotonic and cyclic strength of sands"Journal Of Geotechnical Eng .ASCE ,VOL.114. No10, pp.1089-1109.
11. Ishihara, K., Verdugo, R. and Acacio, A.A. "Characterization of cyclic behavior of sand and post-seismic stability analysis" Proceedings of the Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol 2, pp 45-68.
12. Sasitharan,S.,Robertson P.K.,Sego D.C., andMorgenstern,N.R.(1993); "Collapse behavior of sands " Canadian Geotechnical Journal,VOL30,pp569-577.
13. Sasitharan,S.,Robertson P.K.,Sego D.C., and Morgenstern,N.R.(1994)"State boundary surface for very loose sand and its practical implication " Canadian Geotechnical Journal,VOL31,pp321-334.
14. Bray,J.D.,et.al.,"Sub surface characterization at ground failure sites in adapazari, turkey" Journal Of Geotechnical and Geo environmental Eng., 130(7), pp.673-685, (2004a).
15. Chu, D. B., et al., (2004); "Documentation of soil conditions at liquefaction and non liquefaction sites from 1999 chi-chi (Taiwan) earth quake" Soil Dyn. Earth quake Eng., 24(9-10), pp.647-657.
16. Gratchew I. B., Sassa K., Fukuoka H., (2005). Analysis of earth quake indused land slides in soils with different clay contents in Japan., in proceeding of the international symposium on latest natural disasters-new challenges for engineering geology, geotechnics and civil protection, Sofia, Bulgaria.
17. Sassa K, (2005); Land slide disasters triggered by the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake in Japan, landslides, Vol2, No.2, pp135-142.

18. Yasrobi, S.S. (1376); "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.
19. Ladd, R.S. (1978) "Preparing specimens using under compaction" ASTM, Geotechnical Testing journal, GTGODJ, VOL1, No.1, pp16-23.
20. Naeemifar O. (1385) "Effects of Fine Content With Different Plasticity Values on Liquefaction Potential of Sands" Master of science thesis, Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.
21. Drakhshandi, M. (1385) "Laboratory investigating the effect of plastic fines on the liquefaction potential of sands", PhD thesis, Amirkabir university.
22. Bouferra R., Shahrour I., (2003); Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand. Laboratoire de Mécanique de Lille. University of Sciences and Technologies of Lille. Polytech Lille. France.
23. Georgiannou, V. N., Burland, J. B. & Hight, D. W., (1990); "The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension" Geotechnique 40, No. 3, pp 431-449.
24. Ovando-Shelley, E., Perez G., B. E., (1997); Undrained behaviour of clayey sands in load controlled triaxial tests. Geotechnique 47, No. 1, pp 97-111.
25. Kramer, S and Seed, H.B., (1988); "Initiation of soil liquefaction under static loading condition " Journal Of Geotechnical Eng. ASCE, VOL.114.No4, pp.412-430.
26. Gahremani, M. (1384); "The effect of plastic fines and their plasticity on the liquefaction resistance of saturated sands", MSc thesis, Tehran university.
27. Polito, C.P. (1999); "The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils" PHD Dissertation (Faculty of the Virginia Polytechnic Institute).