



دانشگاه صنعتی امیر کبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۳۳ تا ۱۴۱  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 133- 141



نشریه علمی - پژوهشی امیر کبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)

Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## تأثیر ریزدانه های چسبنده بر مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه انزلی

مجید ابراهیمی<sup>۱</sup>، علی قربانی<sup>۲\*</sup>، یاسر جعفریان<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت ۱۳۹۱/۴/۲۵، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۲۶)

### چکیده

در طبیعت خاک های مخلوط مانند ماسه های رسی، ماسه های سیلتی و سیلت های رسی بیشتر از رس، سیلت و ماسه خالص یافت می شود، در حالیکه اطلاعات درباره خاک های مخلوط نسبت به خاک های خالص بسیار کمتر است. پس نیاز برای مشخص شدن تأثیر ریزدانه بر روی خاک های ماسه ای مستعد روانگرایی، وجود دارد. در این بررسی، ریزدانه چسبنده در نسبت های مختلف به ماسه افزوده شده و آزمایش های سه محوری مونتونیک به منظور بررسی تأثیر میزان این ریزدانه ها بر رفتار برشی زهکشی نشده ماسه انجام پذیرفته است. نمونه ها در وزن مخصوص خشک یکسان تهیه شده و تحت دو فشار همه جانبه متفاوت قرار گرفته اند. نتیجه آزمایش ها نشان می دهد با افزایش ریزدانه ها از صفر تا ۳۰٪ مقاومت برشی زهکشی نشده نسبت به ماسه تمیز کاهش یافته و با افزایش میزان ریزدانه ها از ۳۰٪ این مقاومت افزایش می یابد. همچنین تأثیر ریزدانه ها بر تولید فشار آب منفذی در ماسه اشباع مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج نشان می دهد با افزایش ریزدانه ها تا ۳۰٪ فشار آب منفذی نسبت به ماسه تمیز افزایش یافته و با افزایش ریزدانه ها از این حد، این روند کاهش می یابد.

### کلمات کلیدی

ریزدانه چسبنده، روانگرایی، ماسه، رس، آزمایش سه محوری، مقاومت برشی زهکشی نشده، فشار آب منفذی.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: Ghorbani@guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

هنگام وقوع زلزله، لرزش زمین ممکن است منجر به این شود که خاک دانه ای (غیر چسبنده) مقاومت خود را از دست بدهد و دچار پدیده روانگرایی شود و باعث ایجاد نشست و تخریب سازه هایی شود که روی این بستر قرار دارند. در این پدیده خاک اشباع تحت تاثیر تنش های دوره ای ناشی از زلزله قرار می گیرد و فشار آب حفره ای آن افزایش می یابد که اگر سرعت اعمال بار به گونه ای باشد که خاک فرصت زهکشی داشته باشد روانگرایی اتفاق نمی افتد، اما اگر سرعت اعمال این بارها زیاد باشد و خاک فرصت کافی برای زهکشی نداشته باشد در این حالت ذرات ماسه درون آب شناور و تنش موثر صفر می شود و توده خاک مقاومت برشی خود را از دست می دهد و پدیده روانگرایی رخ می دهد. پس از روانگرایی های وسیعی که در زلزله ۱۹۶۴ نیگاتای ژاپن و آلاسکا (آمریکا) به وقوع پیوست، توجه بسیاری از محققین به مطالعه این پدیده جلب شده است. عمده تحقیقاتی که تاکنون در این رابطه انجام شده است، بر روی ماسه های تمیز و ماسه های سیلت دار متمرکز بوده اند و ماسه های رس دار کمتر مورد توجه قرار گرفته اند، چرا که همواره تصور بر این بوده است که چسبندگی رس مانع از رخداد روانگرایی در این نوع خاک ها خواهد شد. اما در سال های اخیر، روانگرایی در ماسه های رس دار نیز دیده شده است. در مطالعاتی که میورا و همکاران در زلزله سال ۱۹۹۳ هوکایدو نانسای- اوکی انجام دادند، روانگرایی خاک هایی که حاوی ۴۸ درصد ریزدانه و ۱۸ درصد رس بودند را گزارش داده اند [۵]. بسیاری از محققین در مشاهدات محلی گزارش دادند که بخش اعظم این روانگرایی ها در خاک های چسبنده با شاخص پلاستیسیته بیشتر از ۱۰، اتفاق افتاده است. در تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است، نتایج متفاوتی حاصل شده است، علت اصلی پراکندگی نتایج، نادیده گرفتن عوامل فراوان تاثیرگذار بر رفتار خاک است. در حالیکه اکثر تحقیقات محلی تاثیر ریزدانه ها و مخلوط نمودن آنها با ماسه را عامل افزایش مقاومت روانگرایی دانسته اند، بررسی های آزمایشگاهی که بر روی ریزدانه های چسبنده و غیر چسبنده در این زمینه انجام شده است، نشان می دهد که با مخلوط نمودن ماسه با درصد های مختلف ریزدانه، نتایج متفاوتی بدست می آید که در این نتایج افزایش مقاومت روانگرایی، کاهش مقاومت روانگرایی، کاهش و سپس افزایش مقاومت روانگرایی دیده شده است. در تحقیق حاضر در بررسی آزمایشگاهی، تاثیر میزان ریزدانه ها بر مقاومت برشی زهکشی نشده خاک ماسه ای مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر میزان ریزدانه ها بر رفتار

و تولید فشار آب منفذی در نمونه ها نیز بررسی شده است. بدین منظور مجموعه ای از آزمون های سه محوری مونوتونیک انجام شده که در این آزمایش ها، رفتار نمونه ها در نسبت تخلخل کلی ثابت مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تاثیر ریزدانه ها بر مقاومت زهکشی نشده ماسه ها

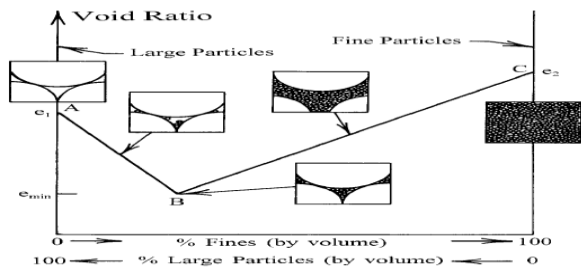
## ۲-۱- ریزدانه های غیر چسبنده

ایشیهارا و زلاتویچ به این نتیجه رسیدند که افزایش سیلت به ماسه توپورا تا ۳۰ درصد منجر به کاهش مقاومت مونوتونیک زهکشی نشده می شود و در نتیجه خط حالت پایدار به سمت پایین حرکت می نماید، ولی خط حالت پایدار نمونه آزمایش شده با ۱۰۰ درصد سیلت بالاتر از خط حالت پایدار در نمونه های حاوی ۲۵ و ۳۰ درصد سیلت است و مقاومت ماسه تمیز نیز بیشتر از مقاومت سیلت خالص است [11]. نائینی و بازیار با افزودن درصد های مختلف ریزدانه غیر چسبنده به ماسه اردبیل به این نتیجه رسیدند که با افزایش ریزدانه تا ۳۵ درصد مقاومت قله کاهش و با افزایش درصد ریزدانه از این میزان مقاومت افزایش می یابد [6].

یامامورا و لید با تغییر ریزدانه غیر چسبنده بین صفر تا ۵۰٪ و با درصد های تراکم مختلف بین ۱۵٪ تا ۴۱٪ به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان ریزدانه غیر چسبنده مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه ها کاهش می یابد [4]. لیاو و چن با افزودن ریزدانه غیر چسبنده به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بصورت وزنی به ماسه، به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد ریزدانه، خطوط حالت پایدار به سمت پایین حرکت می نمایند [2]. نائینی و ضیائی در آزمایش های سه محوری مونوتونیک زهکشی نشده و آزمایش های CPT که روی نمونه ماسه سیلت دار سست به منظور مطالعه همبستگی بین مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه های سیلت دار ( $s_{us}$ ) و نتایج تست مقاومت نوک ( $q_c$ ) انجام داده اند، به این نتیجه رسیده اند که در درصد پایین سیلت (۰ تا ۳۰٪) با افزایش میزان سیلت، مقاومت برشی زهکشی نشده ( $s_{us}$ ) و مقاومت نوک ( $q_c$ ) کاهش می یابد [7].

## ۲-۲- ریزدانه های چسبنده

شفیعی و جعفری با بررسی رفتار شن و ماسه در ترکیب با رس، به این نتیجه رسیده اند که با افزایش مقدار کاتولین در شن و ماسه، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می یابد و با بررسی درصد های مختلف کاتولین (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد) در مصالح دانه ای گزارش داده اند که نمونه حاوی ۴۰ درصد کاتولین بیشترین زاویه اصطکاک داخلی و در نتیجه بیشترین مقدار



شکل (۲): تغییرات نسبت تخلخل با درصد ریزدانه

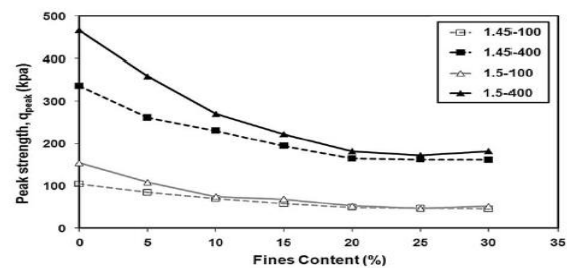
پلیتو در مطالعات خود بر روی ۱۸۵ ترکیب که از اختلاط ۳۷ نوع ماسه و ۵ نوع سیلت بوجود آمده اند، به این نتیجه رسیده است که در ۶۲٪ از ترکیبات، مقدار ریزدانه حدی بین ۲۵ تا ۴۰ درصد بوده است و به طور تقریب در ۱۵٪ ترکیبات، مقدار ریزدانه حدی زیر ۳۵ درصد و نیز در ۲۰٪ ترکیبات، مقدار ریزدانه حدی بیشتر از ۵۰ درصد بوده است. گفتنی است که در این بررسی مقدار ریزدانه حدی کمتر از ۲۵ درصد در هیچکدام از ترکیبات گفته نشده است [8]. مقدار ریزدانه حدی به دانه بندی خاک مبنا و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. به عنوان مثال خاک های خوب دانه بندی شده، فضای خالی کمتری نسبت به خاک های با دانه بندی یکنواخت یا گسسته داشته و ریزدانه کمتری لازم است تا فضای بین دانه ها را پر نماید.

#### ۲-۴- نحوه محاسبه نسبت تخلخل (e)

به منظور محاسبه نسبت تخلخل، پس از پایان آزمایش، فشار همه جانبه بالایی به نمونه اعمال نموده و شیرهای زهکشی را در حالت باز قرار داده یا به عبارت دیگر، نمونه با فشار مؤثر بالایی تحکیم می شود. در این مرحله، وزن آب خارج شده از نمونه را با  $W_1$  نشان داده و  $W_2$  وزن آب موجود در نمونه اصلی می باشد. در مرحله بعد شیرهای زهکشی نمونه در حالت بسته قرار گرفته و فشار همه جانبه نیز از روی نمونه برداشته می شود. پس از خارج نمودن آب درون سلول، قطرات آب روی غشاء و کلاهک نمونه را به کمک فشار باد خشک کرده تا در محاسبه آب داخل نمونه خطا ایجاد نشود. سپس به آرامی غشاء حاوی نمونه را از روی پایه دستگاه برداشته و با دقت زیاد نمونه تر را در داخل ظرفی که از قبل وزن شده، قرار داده و سپس داخل گرمخانه گذاشته می شود. از آنجا که نمونه با تنش بسیار بالایی تحکیم شده به راحتی می توان با چند ضربه آن را از داخل غشاء خارج نمود. وزن نمونه تر، با  $M_{W1}$  نشان داده می شود. سپس به کمک آب فشان ذرات باقیمانده از نمونه بر روی غشاء را شسته و در گرمخانه قرار داده، وزن ذرات خشک شده این قسمت با  $M_{d2}$  نشان داده می شود. پس از خشک شدن نمونه اصلی، وزن نمونه

مقاومت برشی و نمونه شامل ۱۰۰ درصد کائولین دارای کمترین زاویه اصطکاک داخلی و همچنین کمترین میزان مقاومت برشی بوده است. همچنین با افزایش میزان ریزدانه از حد ۴۰ درصد، مقاومت برشی کاهش می یابد و در ۱۰۰ درصد ریزدانه کمترین مقاومت حاصل میشود [3].

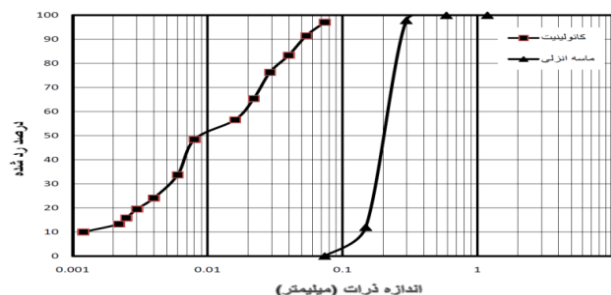
عابدی و یثربی با انجام آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونتونیک بر روی نمونه های ماسه با درصد های مختلف ریزدانه از صفر تا ۳۰ درصد، در دو وزن مخصوص  $1/45 \text{ Kg/cm}^2$  و  $1/5 \text{ Kg/cm}^2$  تحت دو فشار محدود کننده ۱۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به این نتیجه رسیده اند که افزایش میزان ریزدانه چسبنده منجر به کاهش مقاومت برشی پیک و افزایش ناپایداری می شود (شکل (۱)) [10].



شکل (۱): تأثیر ریزدانه های چسبنده رسی بر مقاومت برشی قله

#### ۲-۳- نحوه تأثیر میزان ریزدانه ها بر رفتار ماسه

شکل (۲) بر اساس تغییرات نسبت تخلخل بر حسب درصد ریزدانه رسم شده است. در نقطه A درصد ریزدانه صفر است و دانه های ماسه به خوبی در تماس با یکدیگرند و به راحتی نیرو را منتقل می نمایند. با حرکت از نقطه A به سمت نقطه B، درصد ریزدانه افزایش می یابد و ریزدانه ها، فضای خالی بین ماسه را پر می نمایند و موجب کاهش نسبت تخلخل و در نتیجه افزایش دانسیته نسبی می شوند تا اینکه در نقطه B ریزدانه های افزوده شده بطور کامل فضای خالی بین دانه های ماسه را پر می نمایند که به این مقدار ریزدانه، ریزدانه حدی گفته می شود. با حرکت از نقطه B به نقطه C، میزان ریزدانه افزایش یافته و دانه های ماسه بیشتر از هم جدا شده و ریزدانه ها نقش مهمتری می یابند. تا اینکه با رسیدن به نقطه C ریزدانه غالب شده و کل نمونه را در بر می گیرد.



شکل (۳): منحنی دانه بندی ماسه و کائولینیت

جدول (۱): مشخصات مصالح مورد استفاده

	ماسه انزلی	کائولینیت
سیستم طبقه بندی یونیفاید	SP	CL
متوسط اندازه ذرات، $(D_{50})$	۰/۲۱	-
ضریب یکنواختی، $(C_u)$	۱/۶۶	-
ضریب انحناء، $(C_w)$	۰/۹۹	-
وزن مخصوص، $(G_s)$	۲/۶۷	۲/۶۲
حد روانی (%)	-	۳۸
حد خمیری (%)	-	۲۲
شاخص پلاستیسیته (%)	-	۱۶

به منظور مطالعه تاثیر میزان ریزدانه های چسبنده بر مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه، ۱۰ ترکیب ماسه و کائولینیت مورد آزمایش قرار گرفته است. میزان کائولینیت در نمونه ها از لحاظ وزنی بین صفر تا ۴۵ درصد است. جدول (۲) مشخصات بدست آمده از آزمایش حدود اتربرگ که بر روی همه نمونه ها با درصدهای مختلف رس انجام شده را نشان می دهد. ملاحظه می شود که با افزایش ریزدانه رسی حد روانی و حد خمیری و در نتیجه شاخص پلاستیسیته نمونه ها افزایش یافته است. در نمونه هایی که ۱۵ درصد و کمتر ریزدانه داشتند، شاخص پلاستیسیته صفر است و با افزایش میزان رس در نمونه ها به تدریج این شاخص افزایش یافته که در نمونه حاوی ۴۵ درصد رس به ۹/۶ رسیده است.

خشک اصلی که با  $Md_1$  نشان داده شده بدست می آید. در تمام مراحل اندازه گیری سعی می شود که آب، داخل و یا خارج مجموعه نشود. نسبت تخلخل به روش زیر بدست می آید:

$$M w_1 - M d_1 = W_2 \quad (۱)$$

$$(۲)$$

$$W_1 + W_2 = W_{Total}$$

$$M d_1 + M d_2 = M_{Total} \quad (۳)$$

$$W_{Final} = \frac{W_{Total}}{M_{Total}} \quad (۴)$$

از آنجا که نمونه اشباع است و  $Sr=1$ :

$$Sr \cdot e = W_{Final} \cdot G_s \rightarrow e = W_{Final} \cdot G_s \quad (۵)$$

گفتنی است که در رابطه ۵، چگالی ویژه توده خاک بصورت وزنی محاسبه شده است. با استفاده از این روش، نسبت تخلخل همه نمونه ها بعد از انجام آزمایش اندازه گیری و ثبت شد.

### ۳- معرفی مصالح مورد استفاده

ماسه مورد استفاده، ماسه ساحل دریای خزر است که از ساحل منطقه آزاد انزلی تهیه شده و ریزدانه اضافه شده به آن، رس کائولینیت است. ماسه فوق از نوع بدانه بندی شده است که در دانه بندی انجام شده ۱۰۰ درصد آن از الک شماره ۱۶ (۱/۱۹ میلی متر) و ۱۲ درصد آن از الک شماره ۱۰۰ (۰/۱۵ میلی متر) عبور نموده و اندازه دانه متوسط آن  $(D_{50})$ ، ۰/۲۱ میلی متر است. وزن مخصوص آن ۲/۶۷ گرم بر سانتی متر مکعب و دانه های آن کروی شکل هستند. وزن مخصوص کائولینیت ۲/۶۲ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و به عنوان رس با پلاستیسیته کم با حد روانی ۳۸ و حد خمیری ۲۲ و شاخص پلاستیسیته ۱۶ طبقه بندی می شود. منحنی دانه بندی ماسه و کائولینیت در شکل (۳) نشان داده شده است. مشخصات فیزیکی ماسه و رس شامل متوسط اندازه ذرات، ضریب یکنواختی، ضریب انحناء، وزن مخصوص، حد روانی، حد خمیری و شاخص پلاستیسیته در جدول (۱) نشان داده شده است.

## جدول (۲): نتایج آزمایش های حدود اتربرگ بر روی نمونه ها

با درصدهای مختلف کائولینیت

درصد کائولینیت (%)	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	شاخص پلاستیسیته (%)	فصلیت A
۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰
۱۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۷/۸	۰	۰	۰
۲۰	۹	۶/۹	۲/۱	۱۰/۵
۲۵	۱۱	۷/۲	۳/۸	۱۵/۲
۳۰	۱۳/۶	۸/۲	۵/۴	۱۸
۳۵	۱۶/۵	۱۰	۶/۵	۱۸/۵۷
۴۰	۱۹/۸	۱۲	۷/۸	۱۹/۵
۴۵	۲۳/۱	۱۳/۷	۹/۶	۲۰/۸۸

## ۴- روش ساخت نمونه و نحوه انجام آزمایش

شود. مقدار پارامتر اسکمپتون برای شروع آزمایش حداقل ۰.۹۵٪ در نظر گرفته شده است. اگر این عامل به مقدار مورد نظر نرسید باید از پس فشار ۲ استفاده نمود. پس فشار برای همه نمونه ها یکسان و به میزان ۲۱۰ کیلو پاسکال اعمال شده است. هنگامیکه مقدار B مطلوب حاصل شد، مرحله تحکیم آغاز می شود. در این بررسی همه نمونه ها با دو تنش مؤثر تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال تحکیم شده اند. در این مرحله شیرهای زهکشی نمونه باز شده و توسط استوانه تغییر حجم، میزان آب خروجی از نمونه اندازه گیری می شود. هرچه میزان رس در نمونه بیشتر باشد، این مرحله به زمان بیشتری نیاز دارد، زیرا اگر نمونه بطور کامل تحکیم نشود، فشار آب منفذی اضافی رفتار نمونه را تحت تاثیر قرار می دهد. پس از تحکیم کامل نمونه ها، شیرهای متصل به نمونه مسدود شده تا مانع از زهکشی نمونه شود و فقط شیر اندازه گیری فشار آب منفذی برای ثبت تغییرات فشار آب در نمونه، باید باز باشد. نمونه با کرنش ثابت ۱/۵ میلی متر در دقیقه تحت بارگذاری قرار می گیرد و بارگذاری تا زمانیکه نمونه بطور کامل گسیخته شود و دیگر نتواند بار تحمل کند، ادامه می یابد.

در تحقیق حاضر برای بررسی تاثیر افزایش ریزدانه ها بر رفتار مونوتونیک ماسه اشباع در نسبت تخلخل و دو تنش تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال، آزمایش سه محوری مونوتونیک بر روی مخلوط های ماسه با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد کائولینیت انجام شده است. گفتنی است درصد رس در نمونه ها (FC) بصورت نسبت وزن رس به وزن کل نمونه محاسبه شده است. مشخصات و نتایج آزمایش های سه محوری مونوتونیک انجام شده در جدول (۳) ارائه شده است.

## ۵- بررسی نتایج آزمایش های انجام شده

در این قسمت تاثیر ریزدانه ها بر مقاومت برشی زهکشی نشده، نحوه گسترش فشار آب منفذی و نحوه رفتار نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد. در جدول (۳) مقادیر بیشینه مقاومت برشی زهکشی نشده و فشار آب منفذی اضافی نشان داده شده است. روابط استفاده شده در جدول عبارتند از:

$$p' = \left[ \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \right] - \Delta u \quad (۱)$$

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (۷)$$

$$r_u = \left( \frac{\Delta u}{p'_0} \right) \quad (۸)$$

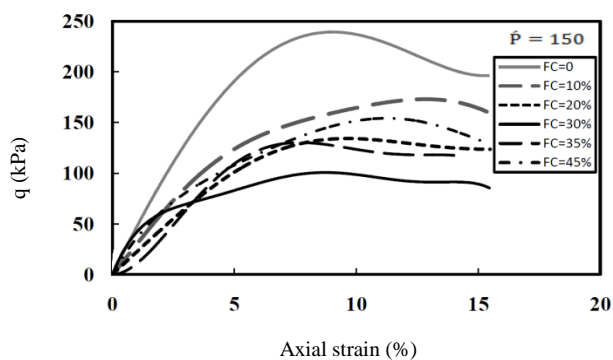
نمونه ها در قالب دو تکه، با قطر ۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی متر به روش نهشتن خشک ۱ ساخته شده اند. بدینصورت که پس از افزوده شدن مقدار رس مورد نظر به صورت وزنی به ماسه، نمونه را در ظرف مخلوط نموده تا رس و ماسه بصورت کاملا یکنواخت با یکدیگر ترکیب شوند، سپس مخلوط به آرامی به داخل قیفی که انتهای آن روی پدستال دستگاه قرار گرفته و خروجی آن بوسیله کاغذی مسدود شده، ریخته می شود، سپس کاغذی که انتهای قیف را مسدود کرده، بیرون کشیده می شود و قیف در امتداد محور قالب به آرامی بالا آورده می شود تا ارتفاع ریزش نمونه صفر شود. بدین ترتیب می توان تا حد امکان از جداسدگی دانه ها جلوگیری نمود. همه نمونه ها در ۵ لایه با وزن و ارتفاع یکسان ساخته شده اند. بوسیله کوبه مخصوص قالب نمونه ساز، نمونه به آرامی متراکم شده و به ارتفاع مورد نظر رسانده می شود. اگر اندازه گرفته شده با اندازه محاسبه شده تفاوت داشته باشد نمونه باید دوباره ساخته شود. بعد از ساخت نمونه، آنرا در محفظه سه محوری قرار داده و مرحله اشباع شروع می شود ابتدا گاز  $CO_2$  را به مدت یک ساعت از داخل نمونه عبور داده پس از جایگزینی هوای محبوس در نمونه بوسیله گاز  $CO_2$  آب بدون هوا، با فشار بسیار کم به داخل نمونه رانده می شود. این مرحله بسته به مقدار رس نمونه، از ۱ تا ۸ ساعت نیاز به زمان دارد. بعد از این مرحله عامل اسکمپتون (B) کنترل می

جدول (۳): مشخصات عمومی و نتایج آزمایش های سه محوری مونوتونیک انجام شده به منظور بررسی تاثیر ریزدانه ها

شماره آزمایش	درصد کائولینیت (FC)	$P'_0$ (kPa)	$e$	$\Delta u$ (kPa)	$r_u$	$r_u$ (%)	$q$ (kPa)
0kA-C150-1	۰	۱۵۰	۰/۵۹۵	۴۲	۰/۲۸	۲۸/۰۰	۲۲۷
0kA-C300-2	۰	۳۰۰	۰/۵۹۸	۱۰۴	۰/۳۵	۳۴/۶۷	۳۳۸
5kA-C150-1	۵	۱۵۰	۰/۵۹۴	۴۳	۰/۲۹	۲۸/۶۷	۱۹۳
5kA-C300-2	۵	۳۰۰	۰/۵۹۲	۱۰۶	۰/۳۵	۳۵/۳۳	۲۸۰
10kA-C150-1	۱۰	۱۵۰	۰/۶۰۱	۴۷	۰/۳۱	۳۱/۳۳	۱۷۳
10kA-C300-2	۱۰	۳۰۰	۰/۵۹۵	۱۰۱	۰/۳۴	۳۳/۶۷	۲۵۸
15kA-C150-1	۱۵	۱۵۰	۰/۶۰۵	۵۱	۰/۳۴	۳۴/۰۰	۱۶۱
15kA-C300-2	۱۵	۳۰۰	۰/۶۰۲	۱۲۵	۰/۴۲	۴۱/۶۷	۲۳۵
20kA-C150-1	۲۰	۱۵۰	۰/۵۸۹	۶۰	۰/۴۰	۴۰/۰۰	۱۳۷
20kA-C300-2	۲۰	۳۰۰	۰/۵۹۲	۱۴۷	۰/۴۹	۴۹/۰۰	۱۸۴
25kA-C150-1	۲۵	۱۵۰	۰/۵۹۹	۷۳	۰/۴۹	۴۸/۶۷	۱۱۲
25kA-C300-2	۲۵	۳۰۰	۰/۶۰۵	۱۷۴	۰/۵۸	۵۸/۰۰	۱۷۳
30kA-C150-1	۳۰	۱۵۰	۰/۵۹۸	۷۹	۰/۵۳	۵۲/۶۷	۱۰۲
30kA-C300-2	۳۰	۳۰۰	۰/۶۰۳	۱۸۹	۰/۶۳	۶۳/۰۰	۱۴۴
35kA-C150-1	۳۵	۱۵۰	۰/۶۰۵	۷۱	۰/۴۷	۴۷/۳۳	۱۳۳
35kA-C300-2	۳۵	۳۰۰	۰/۶۱۵	۱۶۱	۰/۵۴	۵۳/۶۷	۱۹۴
40kA-C150-1	۴۰	۱۵۰	۰/۶۱	۶۰	۰/۴۰	۴۰/۰۰	۱۴۹
40kA-C300-2	۴۰	۳۰۰	۰/۶۲	۱۳۱	۰/۴۴	۴۳/۶۷	۲۲۰
45kA-C150-1	۴۵	۱۵۰	۰/۶۲۵	۵۳	۰/۳۵	۳۵/۳۳	۱۵۵
45kA-C300-2	۴۵	۳۰۰	۰/۶۱۵	۱۱۴	۰/۳۸	۳۸/۰۰	۲۳۲

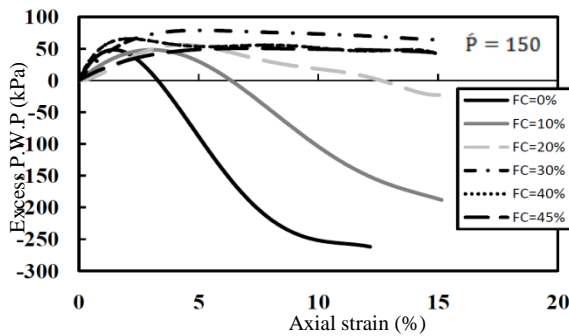
## ۶- تاثیر ریزدانه ها بر مقاومت برشی زهکشی نشده

## ۶-۱- رفتار تنش - کرنش

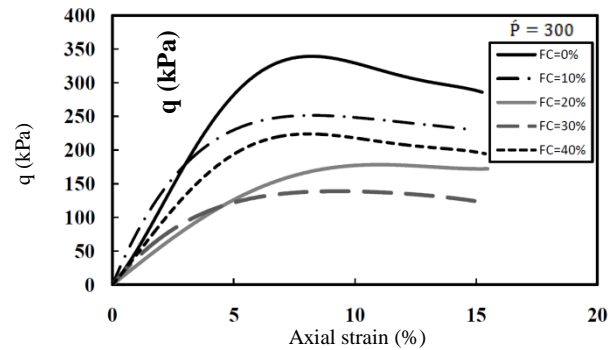


شکل (۴): نمودار تنش - کرنش برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس در تنش تحکیمی ۱۵۰ کیلوپاسکال

نمودار تنش - کرنش برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس در نسبت تخلخل های به طور تقریبی مساوی و تنش های تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، در نسبت تخلخل برابر، با افزایش میزان رس تا ۳۰ درصد مقاومت برشی نمونه ها، نسبت به مقاومت برشی ماسه تمیز کاهش یافته و سپس در نمونه های حاوی بیش از ۳۰ درصد رس، روند کاهش تغییر نموده و مقاومت، افزایش می یابد. با وجود اینکه افزایش مقاومت در این نمونه ها دیده می شود اما به مقاومت ماسه تمیز نمی رسد.



شکل (۷): نمودار تولید فشار آب منفذی در نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس در تنش تحکیمی ۱۵۰ کیلوپاسکال

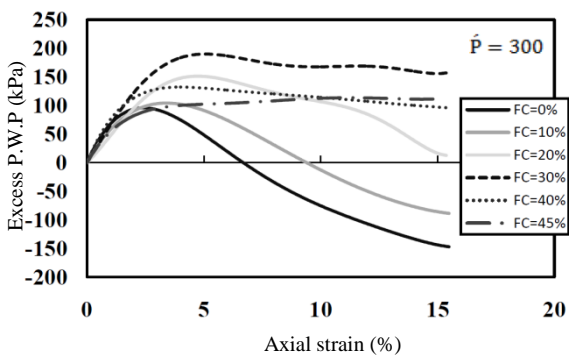


شکل (۵): نمودار تنش- کرنش برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس در تنش تحکیمی ۳۰۰ کیلوپاسکال

#### ۲-۶- تغییرات مقاومت برشی بیشینه نرمال شده

##### با افزایش ریزدانه

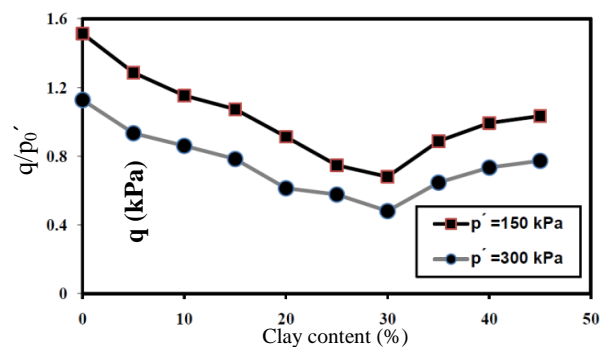
شکل (۶) تغییرات نقطه ای مقاومت برشی بیشینه نرمال شده در لحظه گسیختگی در نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، مقاومت برشی زهکشی نشده بیشینه با افزایش رس به تدریج کاهش می یابد و در نمونه حاوی ۳۰ درصد رس به کمترین مقدار خود می رسد. اما با افزایش رس در نمونه ها از ۳۰ درصد، مقاومت افزایش می یابد.



شکل (۸): نمودار تولید فشار آب منفذی در نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس در تنش تحکیمی ۳۰۰ کیلوپاسکال

#### ۴-۶- تغییرات نسبت تولید فشار آب منفذی بیشینه با افزایش ریزدانه

نسبت تولید فشار آب منفذی که از تقسیم تولید فشار آب منفذی بیشینه به تنش تحکیمی حاصل می شود، با افزایش میزان رس در نمونه دچار تغییراتی شده که در شکل (۹) نشان داده شده است. در این نمودار تغییرات نسبت تولید فشار آب منفذی با افزایش ریزدانه برای نمونه هایی با نسبت تخلخل یکسان و در دو تنش تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش میزان رس از صفر تا ۳۰ درصد نسبت تولید فشار آب منفذی افزایش یافته، اما با افزایش رس از ۳۰ درصد این نسبت کاهش می یابد. افزایش فشار آب منفذی رابطه مستقیمی با افزایش پتانسیل روان شدگی در نمونه دارد، بطوریکه در نمونه های دارای رفتار انبساطی تر (که فشار آب منفذی کمتری ایجاد می شود و نمودار مسیر تنش آنها کمتر به سمت چپ تمایل دارد) این پتانسیل به کمترین مقدار خود می رسد.

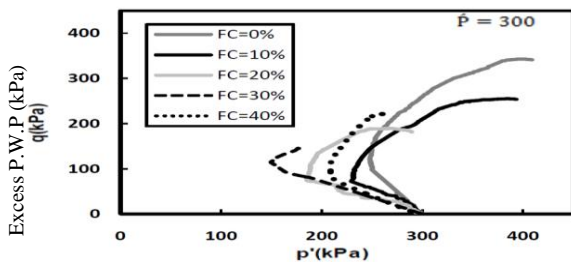


شکل (۶): تاثیر افزایش ریزدانه ها بر مقاومت برشی زهکشی نشده قله در تنش های تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال  
تاثیر ریزدانه ها بر نحوه گسترش فشار آب منفذی

#### ۳-۶- تغییرات فشار آب منفذی - کرنش

نمودار تولید فشار آب منفذی برای نمونه های حاوی مقادیر مختلف رس با نسبت تخلخل های به طور تقریبی مساوی و تنش های تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، در نسبت تخلخل برابر، با افزایش درصد رس، فشار آب منفذی اضافی افزایش می یابد. و در نمونه حاوی ۳۰ درصد رس این فشار به بیشترین مقدار خود رسیده و بعد از آن با افزایش میزان رس این روند تغییر کرده و فشار آب منفذی اضافی کاهش می یابد.

درصد رس منحنی مسیر تنش، بیشتر به سمت چپ تمایل یافته که نمونه دارای ۳۰ درصد رس دارای بیشترین انحراف به سمت چپ یا افزایش فشار آب منفذی است. با افزایش میزان رس، در نمونه حاوی ۴۰ درصد رس تمایل تولید فشار آب منفذی و رفتار انقباضی در نمونه کمتر می‌شود. بنابراین در مقایسه بررسی حاضر با تغییرات حالت پایدار کاسترو، رفتار نمونه‌ها در محدوده روانگرایی محدود قرار می‌گیرند.



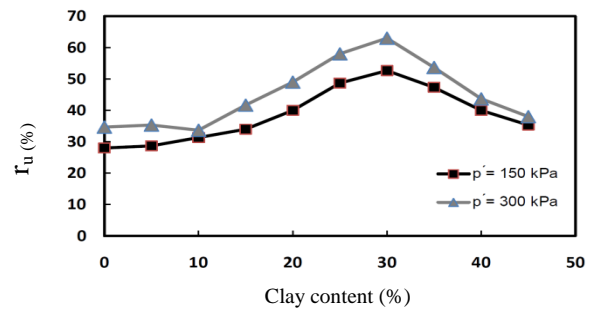
شکل (۱۱): تأثیر مقادیر مختلف رس بر رفتار نمونه‌ها در تخلخل و تنش مؤثر تحکیمی یکسان

#### ۷- نتیجه گیری

به منظور بررسی چگونگی تغییرات نسبت تولید فشار آب منفذی و مقاومت برشی زهکشی نشده ماسه با افزایش ریزدانه، آزمایش‌های سه محوری مونوتونیک بر روی نمونه‌هایی با نسبت تخلخل یکسان و تنش تحکیمی متفاوت انجام پذیرفته است و نتایج آن در زیر ارائه می‌گردد:

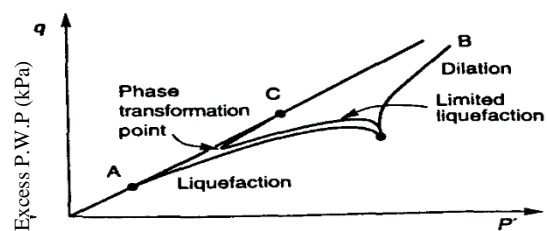
- ۱- در نسبت تخلخل ثابت، با افزودن میزان رس در بافت ماسه تا ۳۰ درصد، مقاومت برشی زهکشی نشده قله کاهش و با افزودن مقدار بیشتر رس، این مقاومت افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش میزان رس تا ۳۰ درصد، شاخص نسبت تولید فشار آب منفذی به تدریج افزایش یافته و در نمونه حاوی ۳۰ درصد رس به بالاترین سطح خود رسیده است، اما با افزایش میزان رس از ۳۰ درصد این شاخص کاهش می‌یابد که در نمونه حاوی ۴۵ درصد رس به طور تقریبی مشابه ماسه تمیز می‌شود.
- ۴- با افزایش میزان رس در نمونه‌ها منحنی مسیر تنش به سمت چپ میل نموده و تمایل به رفتار انقباضی دارد که در نمونه حاوی ۳۰ درصد رس، تمایل به این نوع رفتار بیشتر مشاهده می‌شود. با افزایش میزان رس از حد ۳۰ درصد، تمایل تولید فشار آب منفذی و رفتار انقباضی در نمونه‌ها کمتر می‌شود.

۵- یک روند کلی بین افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده با افزایش شاخص پلاستیسیته وجود دارد. بطوریکه در نمونه حاوی ۴۵ درصد رس، با شاخص پلاستیسیته ۱۰، افزایش این مقاومت نسبت به نمونه‌هایی با درصد کمتر ریزدانه مشهود بوده است.



شکل (۹): تغییرات تولید فشار آب منفذی نرمال شده با افزایش ریزدانه‌ها در تنش تحکیمی ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تأثیر درصد رس بر رفتار نمونه‌ها در تخلخل و تنش مؤثر تحکیمی یکسان

کاسترو در سال ۱۹۶۹ در بررسی‌های خود با استفاده از آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و دوره ای سه نوع رفتار متفاوت را برای نمونه‌ها مطرح نموده است [۱]. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است در نمونه‌های خیلی سست (نمونه A) نمودار مسیر تنش به سمت چپ سوق نموده و نمونه دارای رفتار انقباضی است. این بدان معناست که فشار آب منفذی در نمونه در حال افزایش است، این نوع رفتار به عنوان یک جریان روانگرایی مشخص شده است. در نمونه‌های متراکم (نمونه B) نمودار مسیر تنش به سمت راست میل نموده و با افزایش تنش همه جانبه مؤثر، نمونه به مقاومت مناسب رسیده است، این نوع رفتار موسوم به جریان انبساطی است. نمونه‌های با تراکم متوسط (نمونه C) در ابتدا منحنی مسیر تنش به سمت چپ میل نموده اما پس از رسیدن به موقعیتی که نقطه تغییر فاز نامیده می‌شود، به سمت راست تغییر حالت داده و این تغییر حالت ادامه یافته تا روند افزایشی در تنش همه جانبه مؤثر ثابت شده و نمونه در کرنش‌های بالاتر به مقاومت مناسبی می‌رسد. این نوع رفتار را روانگرایی محدود گویند.



شکل (۱۰): انواع رفتارهای ماسه اشباع در آزمایش‌های مونوتونیک

در بررسی حاضر، در همه نمونه‌ها نمودار مسیر تنش ابتدا به سمت چپ رفته و رفتار انقباضی تمایل یافته و سپس رفتار انبساطی داشته و منحنی مسیر تنش به سمت راست متمایل شده است. در شکل (۱۱) منحنی مسیر تنش برای درصدهای مختلف رس نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش



۸- با افزایش میزان رس، تغییراتی در نحوه گسترش فشار آب منفذی ایجاد می شود، بطوریکه در نمونه های زیر ۱۰ درصد رفتار نمونه انبساطی است و تولید فشار آب منفذی منفی نیز در نمونه ها مشاهده شده اما با افزایش بیشتر رس این روند تغییر نموده است.

۶- در نمودارهای مقاومت برشی نرمال شده و نسبت تولید فشار آب منفذی در درصدهای مختلف رس، در نقطه ای که نسبت تولید فشار آب منفذی بیشترین مقدار را دارد، مقاومت برشی زهکشی نشده در آن نقطه، به کمترین مقدار خود می رسد. ۷- با افزایش میزان ریزدانه ها نسبت تخلخل اسکلت ماسه بیشتر می شود، هر چند که نسبت تخلخل نمونه ثابت است.

## ۸- ضمایم

### فهرست علائم

$e$	نسبت تخلخل نمونه
$M_{Total}$	وزن خشک کل نمونه
$W_2$	وزن آب موجود در نمونه اصلی
$W_{Total}$	وزن کل آب موجود در نمونه
$W_{Final}$	درصد رطوبت داخل نمونه
$p'_0$	تنش همه جانبه اولیه (تنش تحکیمی)، $kPa$
$p'$	تنش مؤثر در هر نقطه، $kPa$
$q$	مقاومت برشی زهکشی نشده، $kPa$
$r_u$	نسبت تغییرات فشار آب منفذی به تنش تحکیمی
$\Delta u$	تغییرات فشار آب منفذی، $kPa$
$\sigma'_1$	تنش محوری، $kPa$
$\sigma'_3$	تنش همه جانبه مؤثر، $kPa$

## ۹- مراجع

- [۴] Lade PV, Yamamuro JA ., "Effects of non-plastic fines on static liquefaction of sands", Can. Geotech. J., No. 34, pp. 918-28, 1997.
- [۵] Miura, S., Kawamura, S., and Yagi, K., "Liquefaction Damage of Sandy and Volcanic Grounds in the 1993 Hokkaido Nansel-Oki Earthquake", Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, pp. 193- 196, 1995.
- [۶] Naeini, S.A., Baziar, M.H., "effect of fines content on steady-state strength of mixed & layered samples of a sand", Soil Dynamics and Earthquake Eng. J., No. 24, pp. 181- 187, 2004.
- [۷] Naeini, S.A. and Ziaei, R., "Evaluation of undrained shear strength of loose silty sands using CPT results", International Journal of Civil Engineering. Vol. 5, No. 2, June, 2007.
- [۸] Polito CP. "The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils", Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1999.
- [۹] Thevanayagam, S ., "Liquefaction Potential and Undrained Fragility of Silty Soils", Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, p. 8, 2000.
- [۱۰] Yasrobi, S. Sh. and Abedi, M., "Effect of plastic fines on the instability of sands", soil dynamics and earthquake engineering, No. 30, pp. 61- 67, 2010.
- [۱۱] Zlatovic, S. and Ishihara, K ., "On the influence of nonplastic fines on residual strength", First Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan, pp. 239- 244, 1995.
- [۱] Castro G., "Liquefaction of sands", Ph.D. Thesis, Harvard Soil Mechanics Series, Harvard University, Cambridge, M.A, 1969.
- [۲] Chen YC., Liao TS ., "Studies of the state parameter and liquefaction resistance of sand", In: Proceedings of the 2nd international conference on earthquake geotechnical engineering, Lisbon, Portugal, pp. 513- 8, 1999.
- [۳] Jafari, M. K., Shafiee, A ., "Mechanical behavior of compacted composite clays", Can. Geotech. J., No. 41, pp. 1152- 1167, 2004.

## ۱۰- زیرنویس ها

- <sup>۱</sup> Dry Funnel Deposition  
<sup>۲</sup> Back Pressure