

ارزیابی تاثیر سرعت بارگذاری بر مقاومت برشی خاک مخلوط رس-ماسه در آزمایش سه محوری

جواد غفاری^{۱*}، رضا بینای^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی مرند، دانشگاه تبریز، ایران
۲- دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۰۳
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:

رفتار مقاومتی خاک
سرعت بارگذاری
آزمایش سه محوری
مخلوط رس-ماسه
تنش محدود کننده

خلاصه: رفتار مقاومتی خاک متأثر از پارامترهای مقاومتی از جمله چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی آن است. این پارامترها تحت تأثیر عواملی نظیر تراکم خاک، جنس خاک، سرعت بارگذاری، درصد رطوبت، تنش محدود کننده و غیره می‌باشند. در این مقاله تأثیر سرعت بارگذاری بر رفتار مقاومت برشی خاک‌های مخلوط رس-ماسه با استفاده از آزمایش سه محوری بررسی شده است. در این تحقیق از ۸ نوع مصالح ترکیبی «رس-ماسه» با نسبت‌های وزنی ۱۰۰:۰، ۸۰:۲۰، ۶۰:۴۰، ۴۰:۶۰، ۳۰:۷۰، ۲۰:۸۰، ۱۰:۹۰ و ۰:۱۰۰ استفاده شده است. برای بررسی تأثیر سرعت بارگذاری، نمونه‌ها تحت سرعت‌های بارگذاری غیریکنواخت شامل ۱/۰، ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه با الگوی بار تعریف شده قرار گرفته‌اند. همچنین از سه تنش محدود کننده ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تغییر ناگهانی سرعت بارگذاری با توجه به مقدار تنش محدود کننده، تأثیر مختلفی بر روی مقاومت نمونه‌های با ترکیب‌های مختلف رس-ماسه دارد. تغییرات تنش انحرافی و همینطور شیب منحنی تنش- کرنش، در لحظه‌ی تغییر ناگهانی سرعت بارگذاری به مقدار مصالح دانه‌ای (درصد ماسه) موجود در خاک مخلوط بستگی دارد. عبارتی دیگر، تغییرات تنش انحرافی و شیب منحنی تنش-کرنش با مقدار ماسه از یک حد به بعد رابطه‌ی مستقیم دارد. این مقدار حدی ماسه برای تنش‌های محدود کننده کم (۱۰۰ کیلو پاسکال)، ۴۰ درصد و برای تنش‌های محدود کننده بیشتر (۳۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال)، ۲۰ درصد است.

۱- مقدمه

می‌باشد که اگر توجه ویژه و کاربردی به آن نشود احتمال فراهم شدن زمینه برای وقوع انواع حوادث اعم از تخریب سازه‌ها در اثر طراحی های غیر مهندسی، بسیار زیاد است بنابراین توجه به رفتار مقاومتی خاک امری بسیار ضروری است. تغییرات دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک، رفتار مقاومتی خاک را تشکیل داده و تحت عواملی نظیر تراکم خاک، جنس خاک، سرعت بارگذاری، درصد رطوبت، تنش محدود کننده و... متغیر می‌باشند که از میان این عوامل توجه بسیار کمی به تأثیر نرخ سرعت بارگذاری بر روی رفتار مقاومتی خاک شده است.

خاک به عنوان فراوان‌ترین و در دسترس‌ترین مواد عمرانی، نقش بخصوصی در امور ژئوتکنیکی دارد چرا که بار تمامی سازه‌ها در نهایت به آن منتقل می‌گردد. با اینکه در طبیعت خاک مخلوط بیشتر از خاک کاملاً خالص یافت می‌شود ولی اطلاعات ژئوتکنیکی آن نسبت به خاک کاملاً خالص کمتر است و همواره ویژگی‌های آن نیز به دلیل تفاوت در وجود درصدهای نسبی مصالح تشکیل دهنده‌ی خاک مخلوط، متغیر است.

مقاومت برشی خاک از جمله مشخصه‌های مهم و حیاتی خاک

تعداد زیادی از مطالعات موردی بزرگ مقیاس، اهمیت اثر زمان

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: j.ghaffari@tabrizu.ac.ir



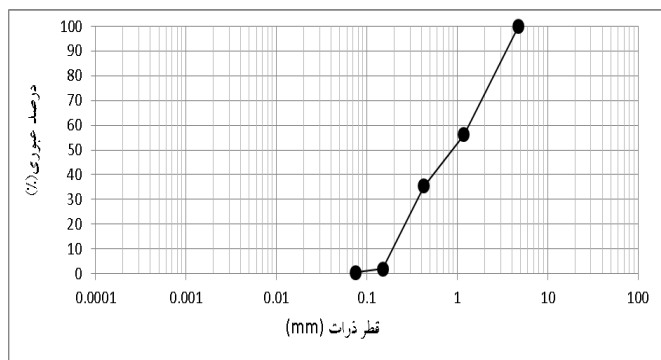
روی رفتار تنش-کرنش مصالح دانه ای را نشان می‌دهد. برای مثال، نشست دراز مدت پی‌های سطحی، ظرفیت باربری وابسته به زمان شمع‌های کوبشی، نشست نهایی سازه های خاکی بزرگ همچون سدهای سنگریزه ای و خاکریزهای بزرگراه‌های بزرگ و مانند آن [۴-۱]. اثر زمان بر رفتار تنش-کرنش مصالح خاکی شامل موارد زیر می‌باشد: (۱) اثر کهولت در خواص تنش-کرنش ذاتی مصالح که ناشی از پیوستگی وابسته به زمان بین ذره ای و هوازگی و غیره می‌باشد. (۲) اثر نرخ بارگذاری ناشی از خواص ویسکوزیته مصالح [۵-۶]. بنابراین فهم صحیح هر دو اثر بالا برای بکار بردن آن‌ها در اجرا ضروری می‌باشد. برای مثال، مقیاس زمان و محدوده نرخ کرنش اساساً بین نمونه های بزرگ مقیاس صحرائی و آزمایش‌های بارگذاری خزش آزمایشگاهی متفاوت است. همچنین مدل رفتاری مناسبی برای پیش بینی دقیق تغییر شکل خزش زمین و جابجایی‌های خزشی سازه مستقر بر روی زمین مبنی بر خواص ویسکوزیته که از آزمایش‌های تنش-کرنش آزمایشگاهی روی مصالح بدست آمده است ضروری می‌باشد. علاوه بر این اطلاعات مفیدی در خصوص ساختار داخلی خاک و اثرات آن روی مکانیزم تغییر شکل می‌تواند از خواص ویسکوزیته مشاهده شده در آزمایش‌های تنش-کرنش آزمایشگاهی استخراج شود [۶-۵].

Kusakabe و Watanabe با ارزیابی اثرات نرخ بارگذاری بر رفتار ماسه‌ها از نظر طراحی لرزه‌ای پایه‌ی شمع‌ها، توسط آزمایش سه محوری، به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش نرخ کرنشی، مقاومت خاک و زاویه اصطکاک داخلی و مدول تغییر شکل، افزایش می‌یابند [۷]. در همین راستا حسینی و ابریشمی با بررسی تاثیر نرخ بارگذاری بر ظرفیت باربری شالوده‌های نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید به این نتیجه رسیده‌اند که برخلاف خاک‌های غیرمسلح، افزایش نرخ بارگذاری منجر به کاهش ظرفیت باربری خاک‌های مسلح می‌شود [۸].

Abrantes و Yamamuro به مطالعه و بررسی رفتار ماسه‌ها تحت نرخ کرنشی بالا توسط دستگاه سه محوری زهکشی نشده پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش نرخ کرنشی، نمونه‌ها مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند [۹]. در سال ۲۰۱۲ Anim و Fakhimi طی مطالعه‌ی بر روی اثر نرخ برشی بر مقاومت برشی توده سنگ‌های کواستا، به این نتیجه رسیده است که زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ‌ها با افزایش نرخ برشی در دو حالت خشک و تر،

بیشتر می‌شود [۱۰]. با این حال برخی محققان به تاثیر درصد اختلاط وزنی مصالح تشکیل دهنده‌ی خاک مخلوط و مقدار تنش محدود کننده بر مقاومت خاک نیز توجه داشته‌اند، مثلاً یثربی و عابدی در سال ۲۰۱۰ با انجام آزمایش سه محوری زهکشی نشده‌ی مونوتونیک (یکنواخت) بر روی نمونه‌های ماسه‌ای با درصد‌های مختلف ریزدانه از صفر تا ۳۰ درصد، در دو وزن مخصوص مختلف و تحت دو فشار محدود کننده به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش میزان ریزدانه چسبنده در خاک مخلوط، مقاومت برشی پیک کاهش یافته و به دنبال آن ناپایداری افزایش یافته است [۱۱]. جعفری و شفيعی با انجام آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده بر روی خاک مخلوط شن و ماسه با رس، تحت بارگذاری یکنواخت (مونوتونیک) به این نتایج رسیده‌اند که مقاومت نمونه‌ها با افزایش مقدار رس، کاهش می‌یابد و به ازای صد در صد مقدار رس، کم‌ترین مقاومت نسبت به خاک مخلوط حاصل شده‌است و با افزایش مقدار مصالح دانه‌ای، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و هرچه تنش محدود کننده بیشتر می‌شود مقاومت نیز بیشتر می‌گردد [۱۲]. طبری و همکاران با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس (۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر) به بررسی پارامترهای مقاومت برشی مخلوط خاک رس و شن پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد شن در خاک مخلوط، زاویه اصطکاک داخلی افزایش و چسبندگی به کمترین مقدار کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها رابطه‌ای بین درصد شن و پارامترهای مقاومت برشی ارائه دادند [۱۳]. Xu و همکاران نیز آزمایش‌های برش ساده سیکلی بر روی مخلوط ماسه-شن با درصد‌های مختلف شن انجام دادند. بر اساس یافته‌های آنها، مقدار شن موجود در مخلوط ماسه-شن تاثیر زیادی بر مشخصات برش ساده سیکلی دارد [۱۴].

Duttine و Tatsuoka خواص ویسکوزیته مصالح دانه ای غیر چسبنده را با انجام آزمایش‌هایی با دستگاه برش مستقیم (با ابعاد ۱۲×۱۲×۱۲ سانتی متر) بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌های خود را با اعمال بارگذاری‌های مختلف شامل تغییر پله ای نرخ جابجایی برشی انجام دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان می‌دهد که خواص ویسکوزیته مصالح دانه ای بیشتر تحت تاثیر شکل ذرات بوده و مستقل از اندازه ذرات می‌باشد [۱۵]. همچنین Duttine و همکاران برای ارزیابی اثر نرخ برش بر رفتار تنش-کرنش مصالح دانه ای، آزمایش‌هایی را با دستگاه برش مستقیم انجام دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان



شکل ۱. منحنی دانه بندی ماسه

Fig. 1. Grain size distribution of sand

۷۶ میلی‌متر بوده است. نیروسنج این دستگاه دارای ظرفیت ۱۰ کیلو نیوتن می‌باشد. داده‌ها توسط حسگرهای الکترونیکی ثبت و به واحد پردازنده اطلاعات (Data logger) ارسال شده و در آنجا پردازش اطلاعات صورت می‌گیرد.

در این تحقیق خاک مخلوط از ۸ نوع ترکیب رُس- ماسه با نسبت‌های وزنی ۱۰۰:۰، ۸۰:۲۰، ۶۰:۴۰، ۷۰:۳۰، ۴۰:۶۰، ۳۰:۷۰، ۴۰:۶۰، ۸۰:۲۰، ۱۰۰:۰، ۹۰:۱۰ و ۱۰۰:۰ مورد استفاده قرار گرفته است. رس مورد مطالعه از دپوی مصالح هسته‌ی رُسی سدگردبان واقع در هادیشهر برداشته شده که حد روانی و حد خمیری آن به ترتیب ۴۸/۴۰ و ۶۵/۱۸ است و همچنین این خاک در گروه خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری پایین (CL) قرار دارد. مصالح ماسه‌ای استفاده شده در این تحقیق از دپوی شرکت میشو بتن منطقه‌ی انامق مرند تهیه گردیده است که با توجه به نتایج آزمایش دانه بندی آن (شکل ۱)، در رده‌ی ماسه‌ی بد دانه بندی شده (SP) قرار دارد. در شکل ۲ مصالح خاکی استفاده شده نشان داده شده است. با توجه به انجام آزمایش تراکم مطابق



شکل ۲. مصالح: الف) ماسه، ب) رس

Fig. 2. Materials: a) sand, b) clay

می‌دهد که برای نمونه‌های متراکم مقاومت برشی ماکزیمم مستقل از نرخ برش می‌باشد در حالی که مقاومت برشی نهایی به طور قابل توجهی با افزایش نرخ برش، کاهش می‌یابد. برای نمونه‌های سست نیز هر دوی مقاومت برشی حداکثر و نهایی با افزایش نرخ برش، کاهش می‌یابند [۱۶]. Pham و همکاران آزمایش‌های سه محوری روی ماسه خشک Hostun جهت بررسی خواص ویسکوزیته ماسه انجام دادند. آنها سه نوع بارگذاری وابسته به زمان شامل: خزش، آسودگی تنش و تغییر نرخ برش را روی رفتار ماسه بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که میزان خزش و آسودگی تنش به تراز تنش و دانسیته نمونه بستگی دارد. مشاهدات تغییر حجم نمونه‌ها بیانگر آنست که نمونه‌ها با کاهش سرعت برش تمایل به اتساع دارند. همچنین با افزایش سرعت برش، کاهش دانسیته ماسه و افزایش تراز تنش، مقدار آسودگی تنش افزایش می‌یابد [۱۷].

با بررسی مطالعات گذشته، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات بر روی تاثیر سرعت بارگذاری بر روی خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای خالص و یا رس خالص بوده است و برای خاک‌های مخلوط که ترکیب‌های متفاوتی از ماسه و رس باشند، بررسی نشده است. لذا در این تحقیق به مطالعه‌ی تاثیر سرعت بارگذاری بر روی رفتار مقاومتی خاک مخلوط "رس-ماسه" توسط دستگاه سه محوری پرداخته شده است. تمامی آزمایش‌ها در طول مطالعه به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند که دسته‌ی اول مربوط به آزمایش‌های اولیه نظیر آزمایش تراکم، دانه بندی، حد روانی، حد خمیری جهت تعیین پارامترهای مقدماتی خاک بوده و دسته دوم مربوط به آزمایش‌های اصلی تحقیق یعنی آزمایش سه محوری فشاری استاندارد می‌باشد. این آزمایش‌ها بصورت یکنواخت (مونوتونیک) نبوده بلکه سرعت بارگذاری در طول آزمایش، طبق الگوی مشخصی بصورت ناگهانی تغییر می‌یابد. علاوه بر تغییر نرخ بارگذاری (سرعت بارگذاری)، تاثیر متغیرهایی همچون تنش محدود کننده و درصد اختلاط وزنی رس و ماسه‌ی تشکیل دهنده‌ی خاک مخلوط نیز بر روی مقاومت برشی خاک بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایش‌ها

۲-۱- دستگاه و مواد آزمایش

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق، دستگاه سه محوری از نوع تحکیم نیافته زهکشی نشده با نمونه‌های به قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع

جدول ۱. نتایج آزمایش تراکم برای درصد‌های مختلف خاک ماسه و رس

Table 1. Results of compaction test for different mixtures of sand- clay

نام نمونه	مقدار خاک ماسه ای (%)	مقدار مصالح رسی (%)	وزن مخصوص خشک ماکزیمم (gr/cm ³)	وزن مخصوص خشک مینیمم (gr/cm ³)	رطوبت بهینه (%)
S100	۱۰۰	۰	۲	۱/۶۳	۷/۵
S90	۹۰	۱۰	۲/۰۵	۱/۶۹	۹/۲
S80	۸۰	۲۰	۲/۱۱	۱/۷۲	۱۰/۶
S70	۷۰	۳۰	۲/۱۵	۱/۷۴	۱۲/۰۱
S60	۶۰	۴۰	۲/۰۹	۱/۶۴	۱۳/۲
S40	۴۰	۶۰	۱/۹۱	۱/۳۸	۱۴/۰۲
S20	۲۰	۸۰	۱/۸۰	۱/۲۸	۱۴/۳
S0	۰	۱۰۰	۱/۶۹	۰/۹۱	۱۴/۷

استاندارد ASTM D^{۶۹۸}A [۱۸]، نتایج آزمایش‌های تراکم برای ترکیب‌های مختلف رُس- ماسه مطابق جدول ۱ است.

۲-۲- نمونه سازی و روش انجام آزمایش

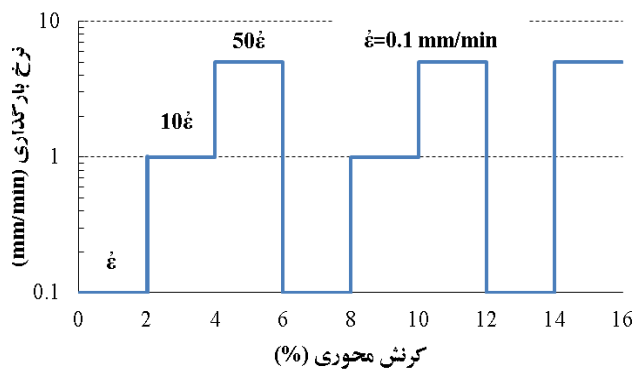
تمامی نمونه‌ها با رطوبت ۵ درصد و دانسیته نسبی ثابت ۶۰ درصد با قطر و ارتفاع ۳۸ و ۷۶ میلی‌متر در سه لایه تهیه شده و جهت اطمینان از پخش یکنواخت رطوبت، هر نمونه حدود ۲۴ ساعت پس از اعمال رطوبت در یک محفظه‌ی پلاستیکی نگهداری شده و سپس اقدام به ساخت نمونه‌ها شده‌است. همچنین برای ایجاد اتصال بهتر بین لایه‌های متوالی در حین تراکم، سطح هر لایه پس از تراکم خراش داده شده‌است. لازم به یادآوری است که در نظر گرفتن دانسیته نسبی ۶۰٪ برای تمامی نمونه‌ها مربوط به شرایط قبل از انجام آزمایش (قبل از اعمال تنش محدود کننده) می‌باشد. قطعاً تراکم نمونه‌های مختلف با توجه به متفاوت بودن مقادیر تنش محدود کننده، قبل از اعمال تنش انحرافی یکسان نخواهد بود. نحوه‌ی انجام آزمایش سه محوری به صورت کنترل کرنشی بوده و بارگذاری ۸ نوع نمونه به گونه‌ای بوده که از الگوی بار اعمالی مطابق شکل ۳ تبعیت می‌کند، بدین صورت که از هر ۲ درصد کرنش محوری، تغییر ناگهانی سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها اعمال گردیده است. هر هشت نمونه طبق این الگوی بار، تحت ۳ نوع تنش محدود کننده با مقادیر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکالی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که به طور کلی به تعداد ۲۴ آزمایش سه محوری فشاری استاندارد با سرعت بارگذاری غیر یکنواخت توسط دستگاه سه محوری تمام اتوماتیک ساخت شرکت آزمون ساز مینا تا کرنش محوری ۱۶ درصد انجام

یافته که در هر مرحله نمودار «تنش انحرافی-کرنش محوری» ترسیم گردیده است. در شکل ۴ نمونه‌های خاکی ساخته شده قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده‌است.

۳- نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- تاثیر سرعت بارگذاری بر منحنی تنش- کرنش خاک مخلوط

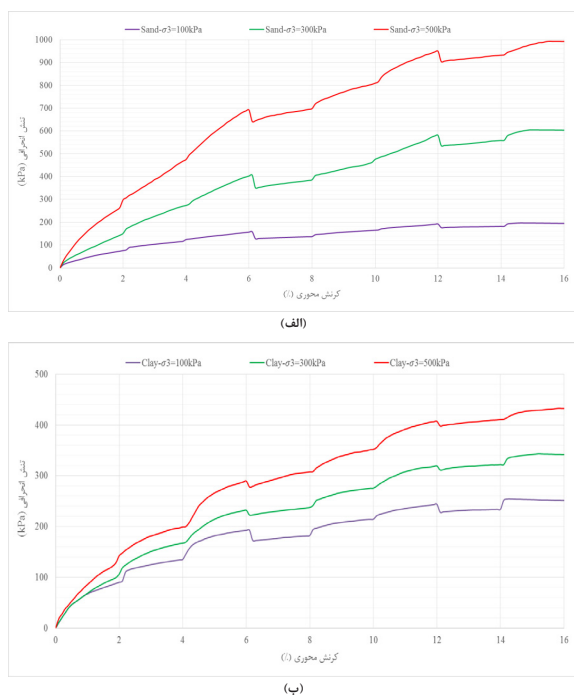
آزمایش‌های سه محوری فشاری بر روی مخلوط‌های ماسه-رُس جهت بررسی تاثیر نرخ بارگذاری بر رفتار مقاومت برشی آن‌ها انجام شده‌است. نتایج این آزمایش‌ها شامل تعیین منحنی تنش انحرافی-کرنش محوری برای تمامی مخلوط‌های ماسه-رُس در فشارهای محدود کننده مختلف است. به عنوان نمونه، منحنی تغییرات تنش انحرافی-کرنش محوری برای ماسه خالص و رُس خالص تحت تنش



شکل ۳. الگوی بارگذاری نمونه‌ها
Fig. 3. Loading pattern of specimens



شکل ۴. تصویر نمونه آماده شده، الف) قبل از بارگذاری، ب) بعد از بارگذاری
Fig. 4. Prepared specimen, a) before loading, b) after loading



شکل ۵. منحنی 'تنش انحرافی- کرنش محوری' تحت بارگذاری الگوی شکل ۳ در تنش‌های محدود کننده ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال: الف) ماسه خالص؛ ب) رُس خالص

Fig. 5. Deviatoric stress- axial strain curve under loading pattern in Figure 3 at confining pressures of 100, 300 and 500 kPa: a) for pure sand, b) pure clay

برابر افزایش؛ در کرنش ۱۴ درصد، ۵۰ برابر افزایش؛ در کرنش‌های ۴ و ۱۰ درصد، ۵ برابر افزایش و در کرنش‌های ۶ و ۱۲ درصد، ۵۰ برابر کاهش می‌یابد.

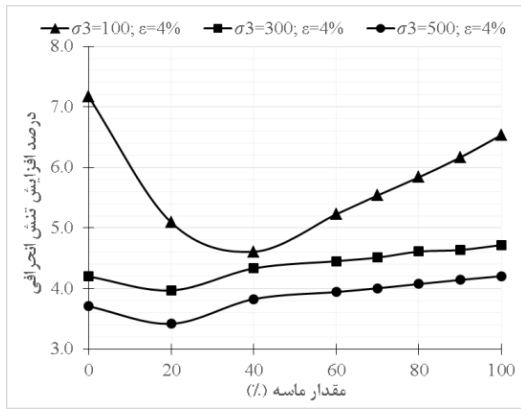
منحنی‌های نشان داده شده در شکل ۶، بیانگر آن است که با

های محدود کننده مختلف با الگوی بارگذاری تعریف شده (شکل ۳) در شکل ۵ نشان داده شده‌است.

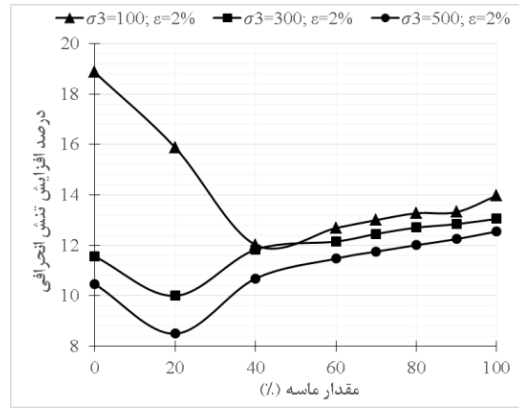
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش ناگهانی سرعت بارگذاری، منحنی به صورت پله‌ای بالاتر کشیده می‌شود و با کاهش ناگهانی سرعت، منحنی بصورت پله‌ای افت می‌کند. همان‌طور که گفته شد در همه نمونه‌های خاک شامل ترکیب‌های مختلف ماسه و رس تقریباً رفتار مشابه شکل ۵ دیده می‌شود با این تفاوت که با تغییر در میزان درصد‌های ماسه و رس در خاک و همین‌طور مقدار فشار محدود کننده، میزان و بزرگی افت‌ها و خیزهای تنش انحرافی متفاوت است که در ادامه به مقادیر درصد‌های افت و خیز نمودارها نیز پرداخته شده‌است.

۳-۲- تغییرات بزرگی افت و خیزهای نمودار تنش-کرنش

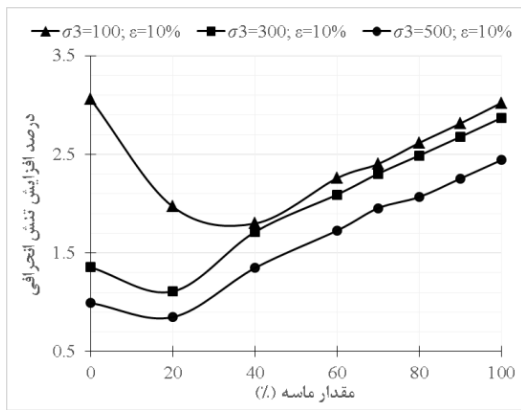
با توجه به شکل ۵، افت و خیزهایی هنگام تغییر سرعت بارگذاری در منحنی‌های تنش-کرنش دیده می‌شوند که بیانگر افزایش یا کاهش مقاومت برشی خاک است. مقادیر این افت و خیزها علاوه بر سرعت بارگذاری به درصد اختلاط وزنی مصالح خاک مخلوط و مقدار تنش محدود کننده نیز وابسته است. مقادیر خیز پله‌ای نمونه‌ها یا مقادیر افزایش تنش انحرافی در لحظه‌ای افزایش سرعت بارگذاری بر حسب درصد در برابر افزایش درصد ماسه مطابق شکل ۶ و مقادیر افت یا میزان کاهش تنش انحرافی نیز به همین ترتیب مطابق شکل ۷ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که مطابق الگوی بارگذاری تعریف شده در شکل ۳، در کرنش‌های ۲ و ۸ درصد، سرعت بارگذاری ۱۰



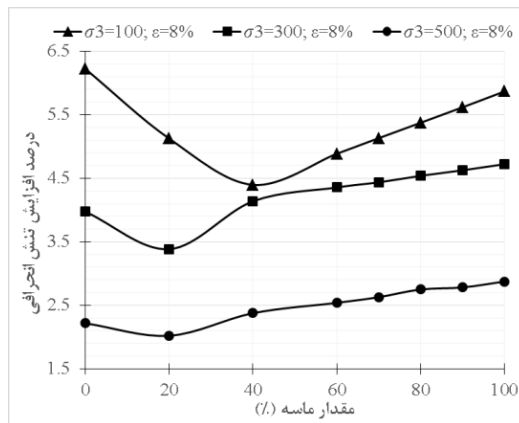
(ب)



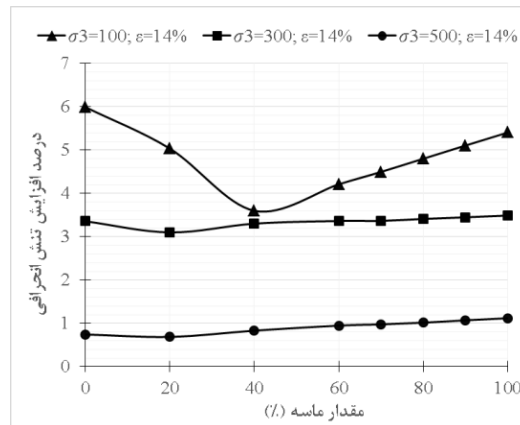
(الف)



(د)



(ج)



(هـ)

شکل ۶. منحنی‌های تغییرات افزایش تنش انحرافی با درصد ماسه در خاک: الف) در کرنش ۲٪، ب) در کرنش ۴٪، ج) در کرنش ۸٪، د) در کرنش ۱۰٪، هـ) در کرنش ۱۴٪

Fig. 6. Variation curves of increased deviatoric stress versus percentage of sand in soil: a) at 2% strain, b) 4% strain, c) 8% strain, d) 10% strain, e) 14% strain

محدودکننده‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال، با افزایش درصد ماسه تا ۴۰ درصد، تغییرات خیز پله‌ای مربوطه نزولی بوده و پس از آن با افزایش درصد ماسه خاک، صعودی می‌شود ولی در نهایت به مقدار متناظر با رُس خالص نمی‌رسد. همچنین با توجه به منحنی‌های شکل ۶، نشان

افزایش درصد خاک ماسه‌ای تا ۲۰ درصد در نمونه‌های با تنش محدودکننده‌ی ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکالی، ابتدا روند خیز پله‌ای نمودار "تنش انحرافی-کرنش محوری" نزولی و سپس با افزایش درصد ماسه در خاک، صعودی می‌شود ولی در نمونه‌های با تنش

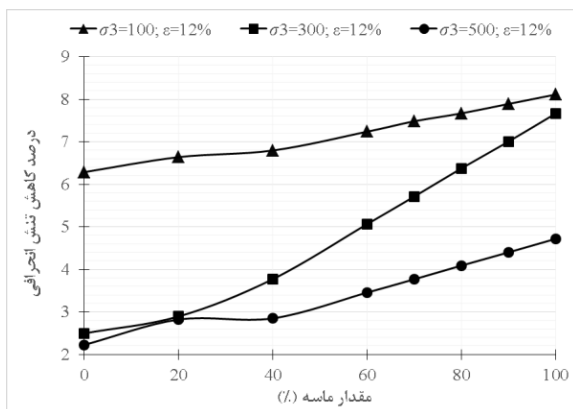
همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، مطابق شکل ۵ با افزایش ناگهانی سرعت بارگذاری، منحنی حالت خیز پله‌ای (افزایش مقاومت) به خود می‌گیرد، دقیقاً مطابق شکل ۵ با کاهش ناگهانی سرعت بارگذاری، نمودار حالت افت (کاهش تنش انحرافی) در کرنش‌های ۶ و ۱۲ درصدی را از خود نشان می‌دهد که تمام جزئیات کاهش مقاومت‌ها برای ترکیب‌های مختلف خاک مخلوط در شکل ۷ آورده شده‌است.

با توجه به منحنی‌های شکل ۷، مشخص می‌شود که تغییرات افت نمودار (کاهش مقاومت) تا درصد ماسه ۲۰ ناچیز بوده ولی با افزایش میزان ماسه از ۲۰ درصد، مقدار کاهش تنش انحرافی ناشی از کاهش سرعت بارگذاری، بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش مقدار تنش محدودکننده از میزان افت مقاومت کاسته می‌شود، یعنی مقادیر افت رابطه‌ی معکوسی با مقدار تنش محدودکننده دارند.

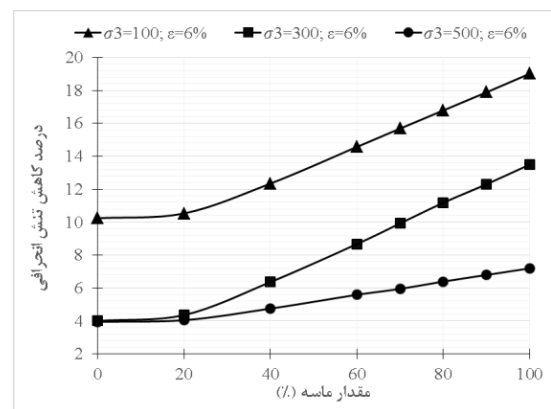
در منحنی‌های شکل ۶، درصد افزایش تنش انحرافی با مقدار افزایش سرعت بارگذاری رابطه‌ی مستقیم دارد به عنوان مثال، افزایش تنش انحرافی در کرنش‌هایی که سرعت ۱۰ برابر بیشتر شده‌است، نسبت به کرنش‌هایی که سرعت ۵ برابر شده‌است، بیشتر است. مقادیر خیز پله‌ای و افت در منحنی‌های تنش-کرنش با تنش محدودکننده رابطه‌ی عکس دارد به طوری که با افزایش تنش محدودکننده، تغییرات خیز یا افت نمودار تنش-کرنش کمتر است. درصد افزایش تنش انحرافی به مقدار ماسه‌ی خاک مخلوط نیز وابسته است. بیشترین افزایش تنش انحرافی ۱۹ درصد و مربوط به کمترین مقدار تنش محدودکننده (۱۰۰ کیلوپاسکال) و رس خالص با بیشترین

داده می‌شود که میزان افزایش تنش انحرافی ناشی از افزایش سرعت بارگذاری در تنش‌های محدودکننده پایین، بیشتر است بعبارتی دیگر، تغییرات خیز پله‌ای نمودارها با مقدار تنش محدودکننده رابطه‌ی عکس دارد.

نتایج مطالعات Mawby و Vallejo نشان می‌دهد که در خاک‌های مخلوط ماسه - رس، برای مخلوط‌های با ماسه کمتر از ۴۰٪، مقاومت برشی کاملاً از مقاومت رس و برای مخلوط‌های با ماسه بیشتر از ۷۵٪، از مقاومت اصطکاکی مابین ذرات ماسه حاصل می‌شود. برای درصد‌های ماسه بین ۴۰ الی ۷۵ نیز، بخشی از مقاومت از چسبندگی رس و بخشی دیگر از اصطکاک بین ذرات ماسه تامین می‌شود [۱۹]. بنابراین می‌توان علت رفتار نمونه خاک در شکل ۶ را اینگونه توجیه کرد که برای درصد‌های ماسه تا ۴۰٪، چون مقاومت برشی خاک مخلوط از مقاومت رس تامین می‌شود لذا با افزایش ماسه (کاهش میزان رس خاک)، مقاومت برشی (تنش انحرافی) خاک مخلوط کاهش می‌یابد. ولی برای خاک‌های با ماسه بیشتر از ۴۰٪، چون مقاومت برشی خاک مخلوط عمدتاً از اصطکاک بین ذرات ماسه تامین می‌شود برای همین با افزایش ماسه، اصطکاک بین ذرات نیز بیشتر شده و افزایش مقاومت برشی (تنش انحرافی) را به همراه دارد. در تنش‌های محدودکننده بالا نیز اصطکاک بین ذرات ماسه می‌تواند سریعتر بسیج شده و باعث افزایش تنش انحرافی شود. لذا در نمودارهای شکل ۶ نیز مشخص است که در تنش‌های محدودکننده بالا، نمودارهای مربوطه سریع‌تر (در درصد ماسه کم، ۲۰٪) روند صعودی خود را نشان داده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۷. منحنی‌های تغییرات کاهش تنش انحرافی با درصد ماسه در خاک: الف) در کرنش ۶٪، ب) در کرنش ۱۲٪

Fig. 7. Variation curves of decreased deviatoric stress versus percentage of sand in soil: a) at 6% strain, b) 12% strain

۳-۳- تغییرات شیب منحنی تنش- کرنش

روند افزایش تنش انحرافی خاک یا شیب نمودار تنش-کرنش به عواملی همچون سرعت بارگذاری، تنش محدودکننده و درصد اختلاط وزنی مصالح خاک مخلوط بستگی دارد. تمامی تغییرات نسبت شیب منحنی‌های تنش-کرنش در شکل ۹ تحت پارامترهای ذکر شده در بالا و در بازه های کرنشی مختلف آورده شده است. لازم به توضیح است که در کرنش‌های اولیه می‌توان شیب منحنی‌ها را به عنوان مدول الاستیسیته‌ی اولیه خاک در نظر گرفت و در مورد تغییرات آن تحت عوامل مختلف اظهار نظر کرد.

در شکل ۹ محور قائم منحنی‌ها، نسبت شیب منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها به شیب مربوط به منحنی رس خالص (ماسه صفر درصد) است که به صورت (S_g/S_{g0}) بیان شده است. S_g شیب منحنی‌های تنش-کرنش ترکیبات مختلف خاک ماسه-رس و S_{g0} شیب منحنی تنش-کرنش ماسه‌ی ۰٪ (رس خالص) است. نحوه‌ی محاسبه شیب بصورت نسبت اختلاف تنش‌ی ابتدا و انتهای منحنی تنش-کرنش به اختلاف کرنشی دو سر آن می‌باشد.

۳-۳-۱- اثر سرعت بر تغییرات شیب منحنی تنش-کرنش

با توجه به شکل‌های ۳ و ۵ هر بازه‌ی کرنشی دارای سرعت‌های بارگذاری متفاوتی می‌باشد. شکل ۹ بیانگر آن است که شیب بیشتر مربوط به منحنی‌هایی است که محدوده‌ی سرعت‌های بارگذاری بیشتری دارند. یعنی شیب منحنی‌های تنش-کرنش رابطه‌ی مستقیمی با سرعت بارگذاری دارد. در مطالعات محققان دیگر نیز این رفتار مشاهده شده است. نتایج مطالعات Watanabe و Kusakabe نشان می‌دهد که افزایش سرعت بارگذاری ماسه باعث افزایش مدول سکانت به میزان ۳۰ الی ۱۵۰٪ می‌شود [۱۷]. همین‌طور با افزایش سرعت بارگذاری، ۱۱۵٪ افزایش در مدول سکانت اندازه گیری شده در ۱٪ کرنش محوری در مطالعات Yamamuro و همکاران بر روی ماسه خشک حاصل شده است [۲۲].

۳-۳-۲- اثر تنش همه جانبه بر تغییرات شیب منحنی تنش-کرنش

کرنش

همان‌طور که از شکل‌های ۹ (بعنوان مثال شکل‌های ۹ ه و ۹ ی) مشخص می‌شود افزایش شیب منحنی تنش-کرنش ناشی از افزایش

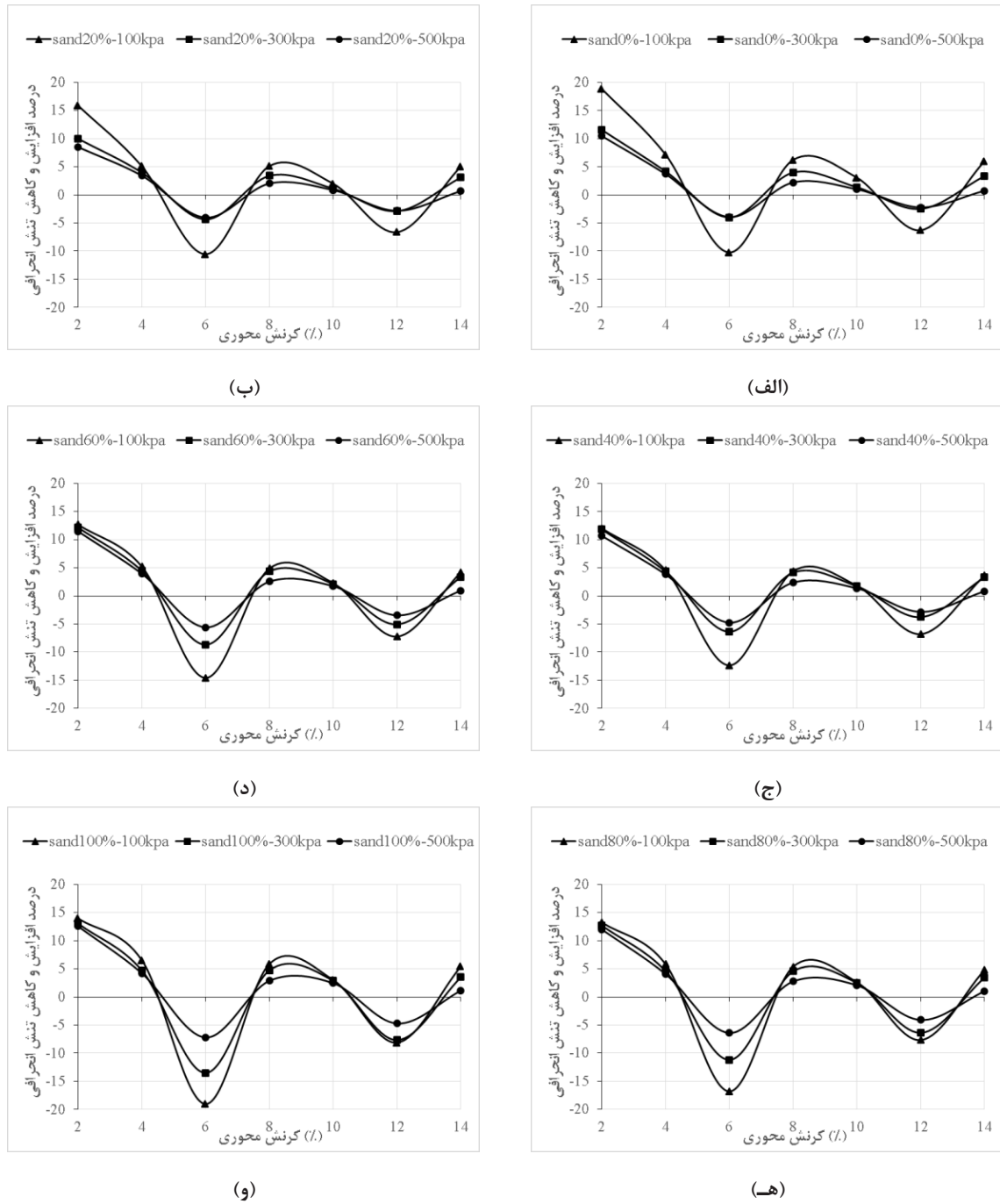
مقدار تغییر سرعت بارگذاری (افزایش ۱۰ برابری) و کمترین کرنش محوری (۲٪) است. همچنین بیشترین درصد کاهش تنش انحرافی نیز ۱۹ درصد بوده که مربوط به کمترین مقدار تنش محدودکننده (۱۰۰ کیلوپاسکال) و ماسه خالص با کمترین مقدار کرنش محوری (۶٪) است. مقادیر درصد افزایش تنش انحرافی به دست آمده در این تحقیق، مطابق با نتایج مطالعات محققان دیگر است. Casagrande و Shannon مقدار افزایش تنش انحرافی ماسه ناشی از افزایش سرعت بارگذاری را تقریباً ۱۰٪ گزارش کردند [۲۰]. همچنین Seed و Lundgren برای ماسه متراکم اشباع، ۱۵ الی ۲۰ درصد افزایش در مقاومت برشی ناشی از افزایش سرعت بارگذاری را به دست آوردند [۲۱].

با افزایش سرعت بارگذاری بطور میانگین ۳۰٪ افزایش در نسبت تنش‌های اصلی ماکزیمم در مطالعات Yamamuro و همکاران بر روی ماسه خشک حاصل شده است [۲۲]. Svoboda and McCartney بر روی رس متراکم شده اشباع آزمایش‌های سه محوری (CU) انجام دادند که نتایج آن‌ها افزایش ۹٪ تنش انحرافی را با افزایش سرعت بارگذاری نشان می‌دهد [۲۳]. همچنین Mun و همکاران مقدار افزایش تنش انحرافی خاک رسی متراکم با رطوبت‌های مختلف را ۴/۱ الی ۹/۷ درصد به دست آوردند [۲۴].

تاثیر سرعت بارگذاری بر میزان افزایش و یا کاهش تنش انحرافی نمونه‌ها با ترکیب‌های مختلف ماسه و رس در شکل‌های ۸ نیز نشان داده شده است. در این شکل‌ها که هر کدام برای ترکیب‌های مختلف خاک مخلوط ترسیم شده است محور افقی، کرنش محوری بوده که مطابق الگوی بارگذاری شکل ۳، هر کرنش محوری معرف یک سرعت بارگذاری خاصی است. همچنین محور قائم درصد افزایش و یا کاهش تنش انحرافی را نشان می‌دهد که در آن علامت مثبت، معرف افزایش تنش انحرافی و علامت منفی نیز نشان دهنده کاهش تنش انحرافی است.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ مشاهده می‌شود می‌توان فهمید که تاثیر تغییرات سرعت بارگذاری بر تنش انحرافی خاک در ترازهای کرنش پایین‌تر، بیشتر است.

جزئیات کامل مقادیر عددی افزایش و کاهش تنش انحرافی ناشی از تغییرات سرعت بارگذاری در دستگاه سه محوری در جدول ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۸. منحنی‌های تغییرات افزایش و کاهش تنش انحرافی با کرنش محوری؛ الف) ماسه ۰٪، ب) ماسه ۲۰٪، ج) ماسه ۴۰٪، د) ماسه ۶۰٪، ه) ماسه ۸۰٪ و و) ماسه ۱۰۰٪

Fig. 8. Variation curves of increased and decreased deviatoric stress versus axial strain: a) 0% sand, b) 20% sand, c) 40% sand, d) 60% sand, e) 80% sand and f) 100% sand

جدول ۲. مقادیر درصد افزایش و کاهش تنش انحرافی برای درصد‌های مختلف خاک ماسه و رس در سرعت‌های بارگذاری مختلف

Table 2. Percentage of increased and decreased of deviatoric stress for different mixtures of sand -clay at different loading rates

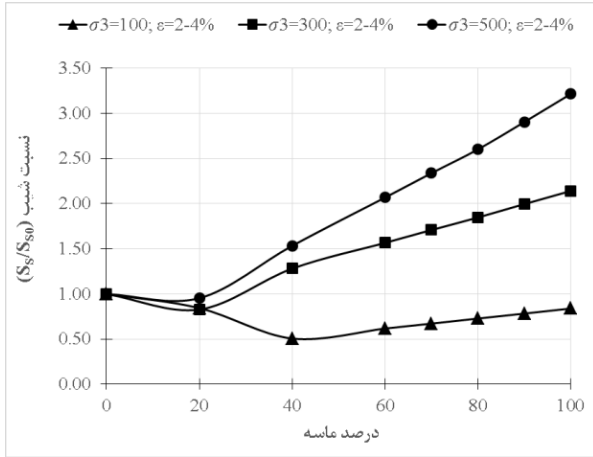
عنوان	نوع مصالح			٪۰ ماسه			٪۲۰ ماسه			٪۴۰ ماسه			٪۶۰ ماسه			٪۸۰ ماسه			٪۹۰ ماسه			٪۱۰۰ ماسه		
	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$	$\sigma_r=500 \text{ kPa}$	$\sigma_r=300 \text{ kPa}$	$\sigma_r=100 \text{ kPa}$
درصد خیز پله‌ای در کرنش ٪۲	۱۲/۵	۱۳/۰	۱۳/۹	۱۲/۲	۱۲/۸	۱۳/۳	۱۲/۰	۱۲/۷	۱۳/۲۷۳	۱۱/۴	۱۲/۱	۱۲/۶	۱۰/۶	۱۱/۸۲	۱۲/۰	۸/۴	۹/۹	۱۵/۸	۱۰/۴	۱۱/۵	۱۸/۸	۱۲/۵	۱۳/۰	۱۳/۹
درصد خیز پله‌ای در کرنش ٪۴	۴/۲	۴/۷	۶/۵	۴/۱	۴/۶	۶/۱	۴/۰	۴/۶	۵/۸	۳/۹	۴/۴	۵/۲	۳/۸	۴/۳	۴/۶	۳/۴	۳/۹	۵/۰	۳/۷	۴/۱	۷/۱	۴/۷	۴/۷	۶/۵
درصد افت در کرنش ٪۶	۷/۲	۱۳/۵	۱۹/۰	۶/۷	۱۲/۳	۱۷/۸	۶/۳	۱۱/۱	۱۶/۷	۵/۵	۸/۶	۱۴/۵	۴/۷	۶/۳	۱۲/۳	۴/۰	۴/۳	۱۰/۵	۳/۹	۴/۰	۱۰/۲	۱۳/۵	۱۳/۰	۱۳/۹
درصد خیز پله‌ای در کرنش ٪۸	۲/۸	۴/۷	۵/۸	۲/۷	۴/۶	۵/۶	۲/۷	۴/۵	۵/۳	۲/۵	۴/۳	۴/۸	۲/۳	۴/۱	۴/۳	۲/۰	۲/۳	۵/۱	۲/۲	۳/۹	۶/۲	۴/۷	۴/۷	۶/۵
درصد خیز پله‌ای در کرنش ٪۱۰	۲/۴	۲/۸	۳/۰	۲/۲	۲/۶	۲/۸	۲/۰	۲/۴	۲/۶	۱/۷	۲/۱	۲/۲	۱/۳	۱/۷	۱/۸	۰/۸	۱/۱	۱/۹	۰/۹	۱/۳	۳/۰	۲/۴	۲/۴	۳/۰
درصد افت در کرنش ٪۱۲	۴/۷	۷/۶	۸/۱	۴/۴	۷/۰	۷/۸	۴/۰	۶/۳	۷/۶	۳/۴	۵/۰	۷/۲	۲/۸	۳/۷	۶/۷	۲/۸	۲/۸	۶/۶	۲/۲	۲/۴	۶/۲	۴/۷	۴/۷	۶/۵
درصد خیز پله‌ای در کرنش ٪۱۴	۱/۱	۳/۴	۵/۴	۱/۰	۳/۴	۵/۱	۱/۰	۳/۴	۴/۸	۰/۹	۲/۳	۴/۲	۰/۸	۳/۳	۳/۶	۰/۶	۳/۱	۵/۰	۰/۷	۳/۲	۵/۹	۴/۷	۴/۷	۶/۵

کرنش

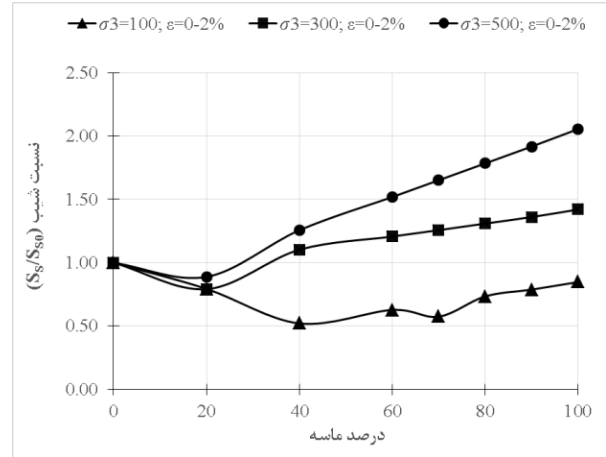
با استناد به نتایج ارائه شده در شکل ۹ می‌توان بیان کرد که مقدار مصالح دانهای (ماسه) موجود در خاک بر روند تغییرات شیب نمودار ناشی از تغییر سرعت بارگذاری تاثیر دارد به طوری که در تنش‌های محدودکننده‌ی مختلف، افزایش ماسه تا یک حدی، رابطه‌ی معکوس با شیب منحنی داشته و پس از آن رابطه‌ی مستقیم دارد. بدین صورت که در تنش‌های محدودکننده‌ی کمتر (۱۰۰ کیلوپاسکال)، افزایش مقدار ماسه تا ۴۰ درصد و در تنش‌های محدودکننده‌ی بیشتر (۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال)، افزایش ماسه تا ۲۰ درصد، باعث کاهش نسبت شیب منحنی تنش-کرنش می‌گردد ولی از این مقادیر به بعد با افزایش ماسه روند افزایش شیب حالت صعودی دارد. این رفتار به شکلی دیگر در نمودارهای شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

سرعت بارگذاری، برای نمونه‌هایی که تحت تنش محدود کننده بالایی قرار گرفته‌اند بیشتر است. می‌توان گفت که تنش محدودکننده‌ی بیشتر با سرعت بارگذاری بیشتر، در افزایش تنش انحرافی یا شیب نمودارها تاثیر چشمگیری دارد. با توجه به شکل ۹ می‌توان نتیجه گرفت که میزان اختلاف شیب منحنی تنش-کرنش در تنش‌های محدود کننده مختلف برای خاک‌های با درصد ماسه کم، ناچیز است در حالیکه این اختلاف برای خاک‌های با درصد ماسه بیشتر، خیلی زیاد می‌باشد. بعبارتی دیگر، در خاک‌های با ماسه بیشتر، مقدار تنش محدود کننده تاثیر زیادی بر روی تغییرات شیب منحنی تنش-کرنش ناشی از تغییرات سرعت بارگذاری دارد.

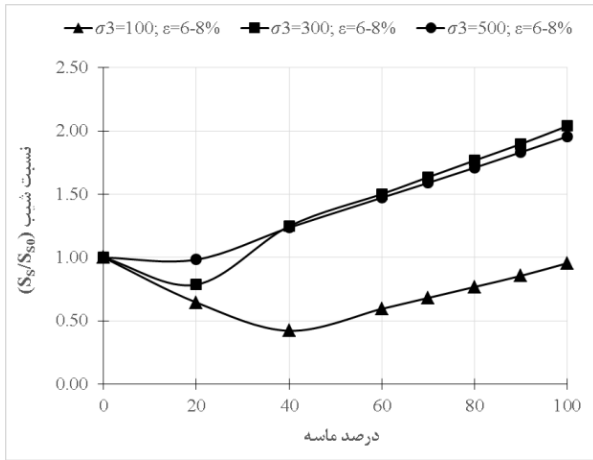
۳-۳-۳- اثر مقدار ماسه بر تغییرات شیب منحنی تنش-



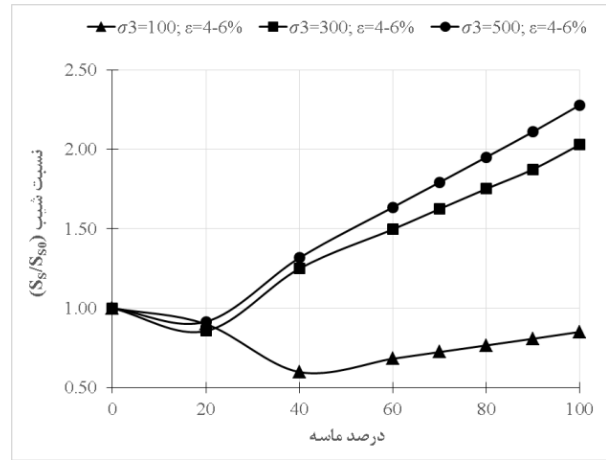
(ب)



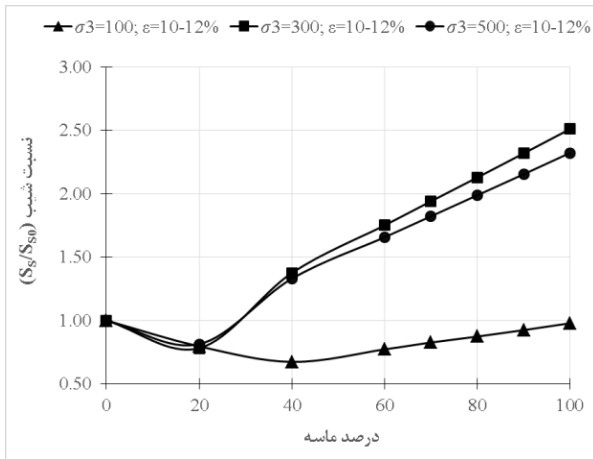
(الف)



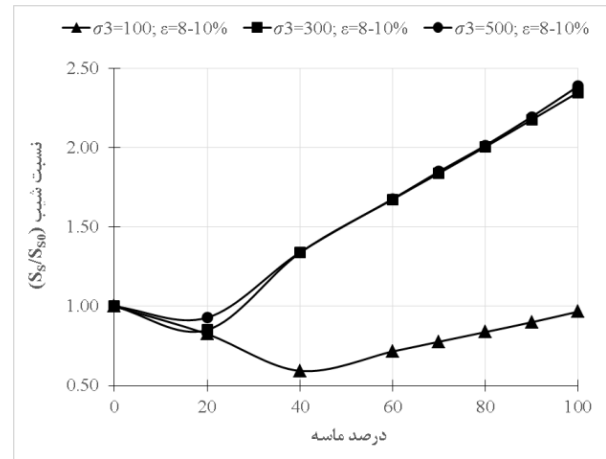
(د)



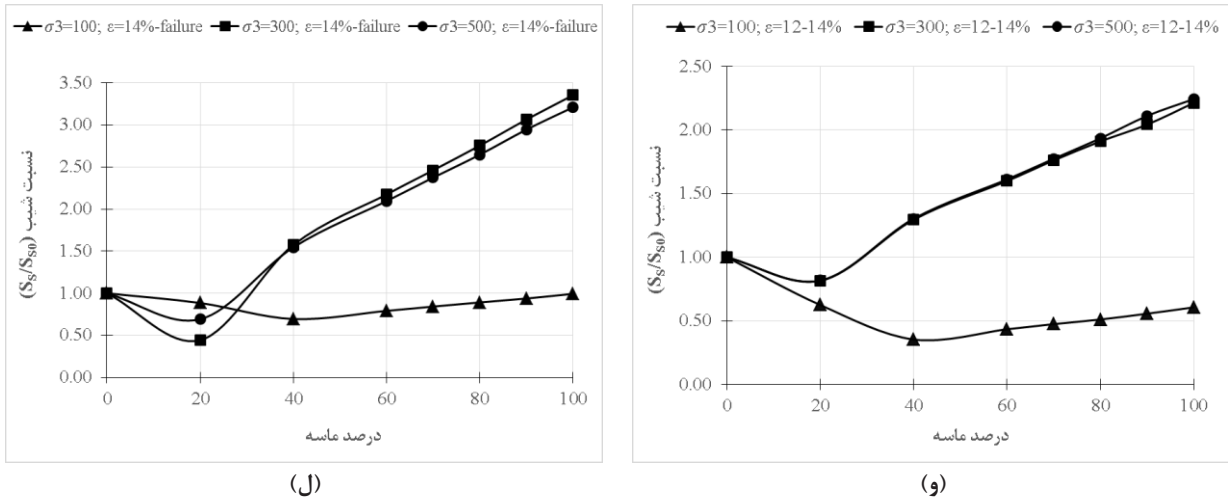
(ج)



(ی)

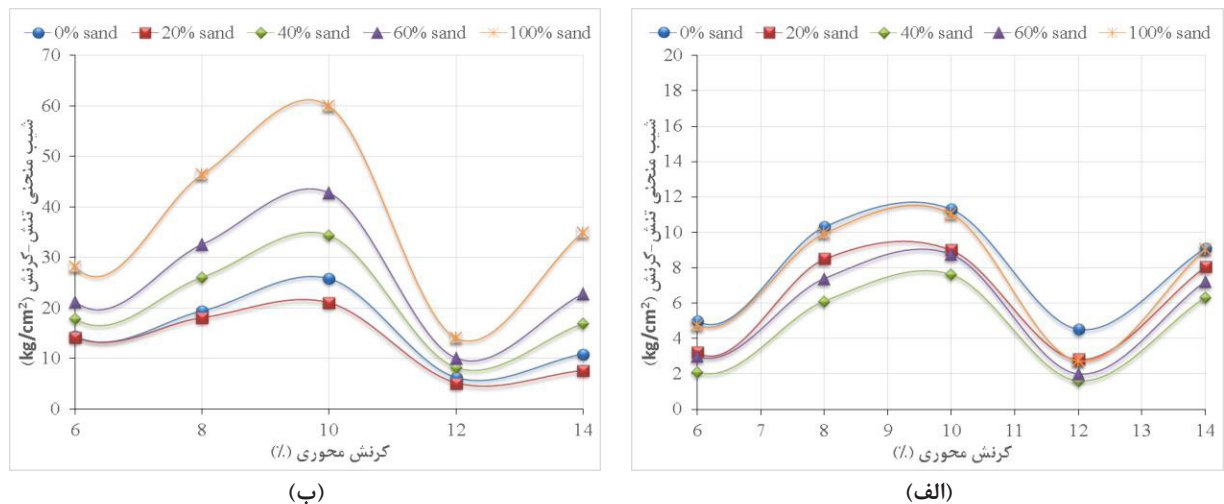


(هـ)



شکل ۹. نسبت شیب منحنی های تنش- کرنش
 الف) در کرنش ۰-۲٪، ب) در کرنش ۲-۴٪، ج) در کرنش ۴-۶٪، د) در کرنش ۶-۸٪، ه) در کرنش ۸-۱۰٪، ی) در کرنش ۱۰-۱۲٪، و) در کرنش ۱۲-۱۴٪، ز) در کرنش ۱۴٪ تا گسیختگی نمونه

Fig. 9. Slope ratio of stress-strain curves: a) at strain of 0-2%, b) strain of 2-4%, c) strain of 4-6%, d) strain of 6-8%, e) strain of 8-10%, f) strain of 10-12%, g) strain of 12-14% and h) strain of 14%-failure



شکل ۱۰. منحنی های تغییرات شیب منحنی با کرنش محوری با درصد های مختلف ماسه در خاک
 الف) تنش محدود کننده ۱۰۰ کیلوپاسکال، ب) تنش محدود کننده ۵۰۰ کیلوپاسکال

Fig. 10. Variation of curves slope versus axial strain for different percentage of sand in soil at confining stresses of; a) 100 kPa, b) 500 kPa

از آزمایش های سه محوری فشاری استاندارد توسط دستگاه آزمایش سه محوری از نوع زهکشی نشده ی تحکیم نیافته ی تمام اتوماتیک ساخت شرکت آزمون ساز مبنا تحت تنش های محدود کننده ی ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. شرایط انجام آزمایش ها بگونه ای است که تراکم تمامی نمونه ها مقدار ثابت ۶۰ درصد و رطوبت نمونه ها نیز مقدار ثابت ۵ درصد در نظر گرفته شده و بارگذاری طبق الگوی بار مشخص شکل ۳ اعمال گردیده است. نرخ بارگذاری بگونه ای بود که از هر ۲ درصد کرنش محوری، سرعت بارگذاری تغییر ناگهانی

جزئیات کامل مقادیر عددی تغییرات شیب منحنی تنش- کرنش ناشی از تغییرات سرعت بارگذاری در دستگاه سه محوری در جدول ۳ ارائه گردیده است.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

جهت بررسی تاثیر نرخ بارگذاری بر روی رفتار مقاومتی خاک مخلوط با نسبت های وزنی مختلف ماسه-رُس (ماسه:رُس، ۰:۱۰۰، ۱۰:۹۰، ۲۰:۸۰، ۳۰:۷۰، ۴۰:۶۰، ۶۰:۴۰، ۸۰:۲۰، ۱۰۰:۰ درصد)،

جدول ۳. مقادیر شیب منحنی تنش-کرنش برای درصدهای مختلف خاک ماسه و رس در سرعت‌های بارگذاری مختلف

Table 3. Slope of stress- strain curves for different mixtures of sand -clay at different loading rates

۱۰۰٪ ماسه			۹۰٪ ماسه			۸۰٪ ماسه			۶۰٪ ماسه			۴۰٪ ماسه			۲۰٪ ماسه			۰٪ ماسه			عنوان
نوع مصالح			نوع مصالح			نوع مصالح			نوع مصالح			نوع مصالح			نوع مصالح			نوع مصالح			
$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	$\sigma_r=500$ kPa	$\sigma_r=300$ kPa	$\sigma_r=100$ kPa	
۱۳۹/۳۸	۷۵/۳۹	۳۷/۴۱	۱۳۰/۰	۷۲/۲۵	۳۴/۸۰	۱۲۱/۰۱	۶۹/۵۱	۳۲/۴۱	۱۰۳/۰۲	۶۴/۰۹	۲۷/۷۰	۸۵/۲۲	۵۸/۵۵	۲۳/۰۰	۶۰/۲۴	۴۲/۰۲	۳۵/۰۴	۶۷/۸۵	۵۳/۱۲	۴۴/۱۸	شیب نمودار در کرنش ۰-۲٪ (Kg/cm^2)
۸۴/۲۶	۵۱/۹۴	۱۴/۹۱	۷۶/۱۲	۴۸/۴۲	۱۳/۹۲	۶۸/۱۸	۴۴/۸۲	۱۲/۹۴	۵۴/۲۱	۳۷/۹۹	۱۰/۹۷	۴۰/۲۰	۳۱/۰۹	۹/۰۰	۲۵/۰۱	۲۰/۰۹	۱۴/۹۹	۲۶/۲۱	۲۴/۲۶	۱۷/۷۷	شیب نمودار در کرنش ۲-۴٪ (Kg/cm^2)
۹۸/۳۶	۵۶/۸۴	۱۵/۵۱	۹۱/۰۹	۵۲/۵۰	۱۴/۷۲	۸۴/۲۰	۴۹/۰۵	۱۳/۹۶	۷۰/۵۵	۴۱/۹۱	۱۲/۴۲	۵۶/۸۰	۳۴/۹۷	۱۰/۸۹	۳۹/۴۴	۲۳/۹۵	۱۶/۴۱	۴۳/۱۴	۲۸/۰۰	۱۸/۲۵	شیب نمودار در کرنش ۴-۶٪ (Kg/cm^2)
۲۸/۱۵	۱۸/۲۷	۴/۷۵	۲۶/۳۷	۱۷/۰۰	۴/۲۵	۲۴/۶۰	۱۵/۸۳	۳/۸۲	۲۱/۲۰	۱۳/۴۵	۲/۹۶	۱۷/۷۹	۱۱/۱۸	۲/۱۰	۱۴/۱۶	۷/۰۵	۳/۲۱	۱۴/۴۰	۸/۹۶	۴/۹۷	شیب نمودار در کرنش ۶-۸٪ (Kg/cm^2)
۴۶/۳۳	۳۰/۳۵	۹/۹۴	۴۲/۶۰	۲۸/۱۲	۹/۲۵	۳۹/۰۹	۲۵/۹۱	۸/۶۲	۳۲/۵۵	۲۱/۶۳	۷/۳۶	۲۶/۰۰	۱۷/۲۸	۶/۱۰	۱۸/۰۲	۱۰/۹۹	۸/۴۸	۱۹/۴۰	۱۲/۹۲	۱۰/۲۹	شیب نمودار در کرنش ۸-۱۰٪ (Kg/cm^2)
۵۹/۹۴	۵۰/۰۶	۱۱/۰۴	۵۵/۶۰	۴۶/۲۳	۱۰/۴۲	۵۱/۳۱	۴۲/۴۴	۹/۸۶	۴۲/۷۷	۳۴/۹۱	۸/۷۲	۳۴/۳۴	۳۷/۴۲	۷/۶۰	۲۰/۹۹	۱۵/۵۸	۸/۹۹	۲۵/۸۰	۱۹/۹۳	۱۱/۳۸	شیب نمودار در کرنش ۱۰-۱۲٪ (Kg/cm^2)
۱۴/۰۰	۱۱/۰۶	۲/۷۳	۱۳/۱۷	۱۰/۲۰	۲/۵۱	۱۲/۰۷	۹/۵۵	۲/۳۰	۱۰/۰۶	۷/۹۹	۱/۹۶	۸/۱۳	۶/۴۷	۱/۵۹	۵/۱۰	۴/۰۷	۲/۸۱	۶/۲۴	۴/۹۹	۴/۵۱	شیب نمودار در کرنش ۱۲-۱۴٪ (Kg/cm^2)
۳۴/۸۷	۳۲/۴۷	۹/۰۲	۳۱/۹۹	۲۹/۶۷	۸/۵۲	۲۸/۷۵	۲۶/۶۷	۸/۱۰	۲۲/۷۷	۲۱/۰۵	۷/۱۹	۱۶/۸۰	۱۵/۲۴	۶/۳۱	۷/۵۲	۴/۲۹	۸/۰۳	۱۰/۸۷	۹/۶۸	۹/۰۸	شیب نمودار در کرنش ۱۴٪ تا گسیختگی نمونه (Kg/cm^2)

* تغییرات تنش انحرافی و همینطور شیب منحنی تنش-کرنش، در لحظه‌ی تغییر ناگهانی سرعت بارگذاری به مقدار مصالح دانه‌ای (درصد ماسه) موجود در خاک مخلوط بستگی دارد. عبارتی دیگر، تغییرات تنش انحرافی و شیب منحنی تنش-کرنش با مقدار ماسه از یک حد به بعد رابطه‌ی مستقیم دارد. این مقدار ماسه برای تنش‌های محدود کننده کم (100 kPa)، ۴۰ درصد و برای تنش‌های محدود کننده بیشتر (300 و 500 kPa)، ۲۰ درصد است.

* هر چند افزایش ماسه از ۴۰ درصد به بعد در تنش‌های محدود کننده ۱۰۰ کیلوپاسکالی، موجب افزایش مقدار تنش انحرافی می‌شود ولی به مقدار مقاومت متناظر رس خالص نمی‌رسد.

* تغییرات افت منحنی تنش-کرنش (کاهش مقاومت) تا درصد

داشته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که رفتار مقاومتی خاک تحت تاثیر تغییرات ناگهانی سرعت، تنش محدود کننده و مقدار مصالح دانه‌ای (درصد ماسه) بوده که نتایج به شرح زیر ارائه گردیده است:

* رفتار مقاومتی خاک کاملاً تابع نرخ بارگذاری بوده بطوریکه با افزایش ناگهانی سرعت بارگذاری شاهد بهبود رفتار مقاومتی و با کاهش ناگهانی آن، تنش انحرافی خاک کاهش می‌یابد.

* درصد افزایش تنش انحرافی یا درصد افزایش خیز پله‌ای منحنی های تنش-کرنش در لحظه‌ی افزایش سرعت بارگذاری، با مقدار افزایش سرعت بارگذاری رابطه‌ی مستقیم و با تنش محدودکننده رابطه‌ی عکس دارد.

- in shear and their mathematical expression, *Soils and Foundations*, 48(1) (2008) 41-60.
- [6] F. Tatsuoka, H. Di Benedetto, W. Kongkitkul, L. Kongsukprasert, T. Nishi, Modelling of ageing effects on the elastoviscoplastic behaviour of geomaterial, *Soils and Foundations*, 48(2) (2008) 155-174.
- [7] K. Watanabe, O. Kusakabe, Reappraisal of loading rate effects on sand behavior in view of seismic design for pile foundation, *Soils and Foundations*, 53(2) (2013) 215-231.
- [8] S. M. Mir Mohammad Hosseini, S. Abrishami, The influence of loading rate on the bearing capacity of strip footings resting on geogrid reinforced sand, *Sharif Civil Engineering Journal*, 28(1) (2012) 39-47. (In Persian)
- [9] J. A. Yamamuro, A. E. Abrantes, Behavior of medium sand under very high strain rates, *Geomechanics: Testing, Modeling, and Simulation*, GSP 143, (2005) 61-70.
- [10] K. Anim, A. Fakhimi, Effect of strain rate on the shear strength of questa rock pile materials, *American Rock Mechanics Association*, (2012).
- [11] M. Abedi, S. Sh. Yasrobi, Effect of plastic fines on the instability of sands, *soil dynamics and earthquake engineering*, 30(3) (2010) 61-67.
- [12] M. K. Jafari, A. Shafiee, Mechanical behavior of compacted composite clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6) (2004) 1152-1167.
- [13] M. K. Tabari, A. TaghaviGhalesari, A. J. Choobbasti, M. Afzalirad, Large-scale experimental investigation of strength properties of composite clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6) (2019) 5061-5075.
- [14] D. S. Xu, H. B. Liu, R. Rui, Y. Gao, Cyclic and postcyclic simple shear behavior of binary sand-gravel mixtures with various gravel contents, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123 (2019) 230-241.
- [15] A. Duttine, F. Tatsuoka, Viscous properties of granular materials having different particle shape in direct shear, *Soils and Foundations*, 49(5) (2009) 777-796.
- [16] A. Duttine, F. Tatsuoka, J. Lee, W. Kongkitkul, Viscous properties of toyoura sand over a wide range of strain rate

ماسه ۲۰ ناچیز بوده ولی با افزایش میزان ماسه از ۲۰ درصد، مقدار کاهش مقاومت ناشی از کاهش سرعت بارگذاری، بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش مقدار تنش محدودکننده از میزان افت مقاومت کاسته می‌شود، یعنی مقادیر افت رابطه‌ی معکوسی با مقدار تنش محدود کننده دارند.

* بیشترین مقدار افت مقاومتی در لحظه‌ی کاهش ناگهانی سرعت بارگذاری، ۱۹ درصد و مربوط به ماسه خالص با تنش همه جانبه‌ی ۱۰۰ کیلوپاسکال و کرنش محوری ۰.۶٪ می‌باشد که در این کرنش، کاهش ناگهانی سرعت بارگذاری ۵۰ برابر بوده است.

* تغییرات نسبی شیب منحنی‌های تنش-کرنش با سرعت بارگذاری و تنش محدود کننده رابطه‌ی مستقیم دارد. بطوریکه افزایش شیب منحنی تنش-کرنش ناشی از افزایش سرعت بارگذاری در نمونه های تحت تنش محدود کننده بالا، بیشتر است.

* تاثیر تغییرات سرعت بارگذاری بر تنش انحرافی خاک در ترازهای کرنش پایین تر، بیشتر است.

مراجع

- [1] F. Tatsuoka, F. Santucci de Magistris, K. Hayano, Y. Momoya, J. Koseki, Some new aspects of time effects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials, *Keynote Lecture, The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Proceedings of the Second International Conference on HSSR, Napoli, Balkema, (2000) 1285-1371.*
- [2] F. Tatsuoka, Inelastic deformation characteristics of geomaterial, *Spacial Lecture, Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and analysis, Proc. Geotechnical Symposium in Roma, Roma, (2007) 1-108.*
- [3] L.A. Oldecop, E.E. Alonso, Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill, *Geotechnique*, 57(3) (2007) 289-301.
- [4] R. Jardine, J.R. Standing, N. Kovacevic, Lessons learned from full scale observations and the practical application of advanced testing and modelling, *Keynote Lecture, Deformation Characterization of Geomaterials, Proc. IS Lyon 2003, (2005) 201-245.*
- [5] F. Tatsuoka, H. Di Benedetto, T. Enemoto, S. Kawabe, W. Kongkitkul, Various viscosity types of geomaterial

- (1948) 29-34.
- [21] H.B. Seed, R. Lundgren, Investigation of the effect of transient loading on the strength and deformation characteristics of saturated sands. Proceedings of American Society for Testing and Materials, 54 (1954) 1288–1306.
- [22] J. A. Yamamuro, A. E. Abrantes, P. V. Lade, Effect of strain rate on the stress-strain behavior of sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(12) (2011) 1169-1178.
- [23] J. S. Svoboda, J. S. McCartney, Shearing rate effects on dense sand and compacted clay, Dynamic Behavior of Materials, 1 (2014) 389-395.
- [24] W. Mun, T. Teixeira, M. C. Balci, J. Svoboda, J. S. McCartney, Rate effects on the undrained shear strength of compacted clay, Soils and Foundations, 56(4) (2016) 719-731.
- and its model simulation, Soils and Foundations, 49(2) (2009) 231-247.
- [17] D. Pham Van Bang, H. Di Benedetto, A. Duttine, A. Ezaoui, Viscous behaviour of dry sand, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 31 (15) (2007) 1631-1658.
- [18] ASTM D698, Standard test method for laboratory compaction characteristics of using standard effort. ASTM Int, West Conshohocken, (2003).
- [19] L. E. Vallejo, R. Mawby, Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures, Engineering Geology, 58 (2000) 125-136.
- [20] A. Casagrande, W. L. Shannon, Stress-deformation and strength characteristics of soils under dynamic loads, In Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

J. Ghaffari, R. Binay, Investigation of Loading Rate Effect on the Shear Strength of Clay-Sand Mixture in Triaxial Test, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1591-1606.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16947.6439](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16947.6439)



