مدول برشی دینامیکی مخلوطهای رس لاغر - دانه

علی شفیعی، استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک / علیرضا سلیمی‌زاد، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پژوهشگاه

۱- چکیده

رسهای مخلوط از انواع مصالح مخلوط با دانه‌بندی گسترده و شامل مصالحی مانند رس، ماسه، شن و حتی قلوه‌سنگ می‌باشند. با توجه به استفاده از رسهای مخلوط در هسته سدهای خاکی و نیز وجود این گونه از مصالح در طبیعت، شناسایی رفتار زهکشی نشده این مصالح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی به منظور شناخت خواص تغییرشکل تناوبی مصالح مخلوط (شامل مدول برشی و تغییرات فشار آب منفذی) بر روی مخلوطهای رس لاغر ـ دانه معرفی شده‌است. نتایج این تحقیق، مبیّن آن است که مدول برشی و فشار آب منفذی متأثر از حجم بخش دانه‌ای است؛ امّا سطح دانه‌ها تأثیری بر آنها ندارد. همچنین نتایج آزمایشها نشان داد که رفتار مکانیکی، متأثر از مسیر بارگذاری است.

کلید واژه‌ها: رس مخلوط، مدول برشی، فشار آب منفذی، مسیر بارگذاری

۲- مقدمه

در نهشته‌های طبیعی و سازه‌های ژئوتکنیکی، طیف وسیعی از خاکهای چسبنده تا دانه‌ای به مقدار فراوان وجود دارد. مورن (Moraine) که از مصالح با منشأ یخچالی است، مثال خوبی از مصالح مخلوط می‌باشد. از این نوع مصالح که شامل رس، سیلت، ماسه، شن و حتی قلوه سنگ می‌باشد در هسته سدهای خاکی و یا به‌عنوان مصالح تشکیل دهنده دایک‌های همگن در آمریکای شمالی و کشورهای اسکاندیناوی استفاده شده‌است [۱]. رسهای مخلوط (Composite Clays) نیز که در زمره مصالح مخلوط به‌شمار می آیند، دانه‌بندی گسترده‌ای دارند و در برگیرنده مصالحی مانند رس، ماسه، شن و حتی قلوه‌سنگ نیز می‌باشند. در رسهای مخلوط فرض بر این است که از یک طرف، بخش دانه‌ای این مصالح باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش تراکم‌پذیری می‌گردد و از طرف دیگر، نفوذپذیری مصالح نیز بوسیله بخش چسبنده، تعیین و کنترل می‌گردد. در هسته سد کرخه (بزرگترین سد خاکی کشور) از رس مخلوط (۶۰٪ رس و ۴۰٪ شن) استفاده شده‌است که افزایش مشخصات مکانیکی هسته سد برای تضعیف پدیده قوسی شدن (Arching) و کاهش نشست دراز مدت را می‌توان به‌عنوان اهداف استفاده از رس مخلوط در هسته سد خاکی کرخه نام برد.

با توجه به اهمیت بررسی رفتار زهکشی نشده رسهای

مخلـوط، مطالعـات جامعـی بـر روی ترکیبهـای مختلفـی از رس ـ شن و رس ـ ماسه صـورت پذیـرفت [۲]. نتایج ایـن مطالعات لـزوم دقت به استفاده از رسهای مخلوط را به‌عنـوان هسـته سدهای خاکی با توجـه به افـزایش فشار آب منفـذی با افزایش درصد بخش دانه‌ای (بویژه در بارگذاریهای دینامیکی) مشخص ساخت.

شفیعی و جعفری در سال ۱۳۸۵ نتایج یک تحقیق جامع آزمایشگاهی را بر روی خـواص تغییرشکل تناوبـی مصالح چسبنده خمیری ـ سنگدانه معرفی کردند [۳]. نتایج آزمایشها مشخص ساخت که در کرنش برشی کم (۰/۱۵٪) مدول برشی در انواع مصالح مخلوط، به تعداد چرخه‌های بارگذاری بستگی نـدارد و با افـزایش مقـدار سنگدانـه‌ها، مدول بـرشی افـزایش می‌یابد؛ لیکن در کرنشهای برشی زیاد (۰/۷۵٪ و ۱/۵٪):

۱ ـ مدول برشی در انواع مصالح مخلوط، تابع تعداد چرخه‌های بارگذاری است؛ به‌طوری که با افزایش تعداد چرخه‌ها، مدول برشی کاهش می‌یابد.

۲ ـ با افـزایش مقـدار سنگـدانـه‌ها تا قبل از چـرخـه دهـم بارگـذاری، مدول برشی افـزایش می‌یابد؛ لیکن بعد از چرخه دهـم (بـه‌دلیل تولیـد فشار آب منفـذی بیشتـر در نمونه‌های حاوی سنگدانـه بیشتـر)، مدول بـرشی در انواع مصالح مخلوط یکسان می‌گردد.

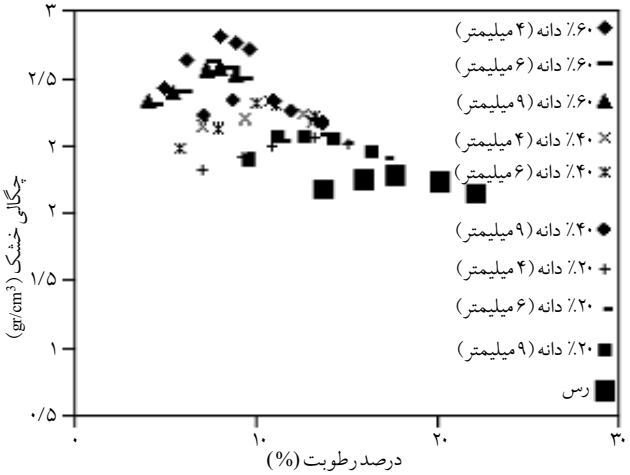
به‌منظـور بـررسی جـامع رفتـار رسهـای مخلـوط و در ادامهٔ مطالعات مذکور تحقیق جـدیدی بـر روی مخلـوطهای رس لاغـر ـ دانـه‌های سرامیکی صورت پذیـرفت. بدین منظـور، دانه‌های کروی با درصدهای حجمی مختلفی (از صفر تا ۶۰٪) با رس لاغر مورد استفاده، ترکیب و تحت آزمایشهای زهکشی نشده سه محوری تناوبی قرار گرفتند. در این مقاله، تأثیر حجم و سطح دانه‌ها بر خواص دینامیکی مخلوطهای رس ـ دانه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. شایان ذکر است که به‌منظور بررسی تأثیر مسیر بارگذاری بر رفتار مکانیکی، آزمونهای تناوبی در دو حالت کنترل تنش و کنترل کرنش صورت پذیرفت.

۳ ـ مصالح مورد استفاده و روش آزمایش

در ایـن تحقیـق، از نمونـه‌های مختلفـی از تـرکیب رس ـ دانه‌های سرامیکی استفاده شد. به‌منظور کاهش ریسک تغییر نشانه خمیری در رسهای طبیعی، از رس تجاری به‌عنوان بخش چسبنده مصالـح مخلوط استفـاده گردیـد. رس مورد استفـاده از نظر کانـی‌شناسی عمدتاً از ایلیت و کلریت تشکیل شده، ضمن اینکه کانیهـای رسی مونتمورلینیت و کائـولینیت و کانیهـای غیـررسی کـوارتـز، کلسیت و فلدسپار نیـز در آن دیـده می‌شود. رس به‌کار برده شده دارای توده ویژه ۲/۷۲، حـد روانـی ۲۹/۵٪ و نشانـه خمیـری ۹/۵٪ می‌باشد. علاوه‌بـر آن، بـرای انتخاب بخش دانـه‌ای از گویهای سرامیکـی بـه قطـرهای ۴، ۶ و ۹ میلیمتری استفاده گردیـد که به‌طـور متوسط توده ویژه ۳/۶۷ دارند.

ده نمونه مختلف از مصالح مخلوط از ترکیب رس با گویهای سرامیکـی به قطـرهای مذکـور به‌منظـور انجـام آزمایشهـا استفاده گردیـد. کلیه درصدهای اختلاط به‌صورت حجمی (نه وزنـی) تعییـن شده و نمونـه‌ها به‌عنـوان C100، C804، C806، C809، C604، C606، C609, C404, C406, C409 نامگذاری شدند؛ به‌طوری که حـرف اول مخفف Clay، عدد بعـد نشان دهنـده درصـد حجمـی رس در نمونـه و حـرف سوم نشان دهنـده قطـر مصالح دانـه‌ای موجود در نمونه می‌باشد. به‌منظـور شبیـه‌سازی شرایـط محل (ماننـد مصالـح هستـه سدهای خاکی)، تمام نمونـه‌ها به‌صورت متراکم و در رطوبتـی برابر بیش از دو درصد رطوبت بهینه با قطر ۷ و ارتفاع ۱۴ سانتیمتر،

در شش لایه تهیه و با وزن مخصوص خشک برابر ۹۵ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد ساخته شدند. منحنی تراکم مصالح مورد آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده‌است. با توجه به شکل مذکور می‌توان استنباط کرد که با افزایش حجم دانه‌های سرامیکی، رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. این در حالی است که حداکثر وزن مخصوص خشک مصالح افزایش می‌یابد؛ لیکن به‌نظر می‌رسد قطر دانه‌ها تأثیر چندانی روی پارامترهای مذکور ندارد.



شکل (۱): نمودار تراکم استاندارد مصالح مورد استفاده

پس از اتمام اشباع، نمونه‌ها تحت تحکیم همسان تک‌پله‌ای در تنش همه جانبه 350kPa قرار گرفتند. سپس شیرهای بالا و پایین نمونه بسته‌شد و نمونه تحت بارگذاری سه محوری تناوبی قرار گرفت. از آنجایی‌که در این تحقیق یکی از اهداف، بررسی تغییرات فشار آب منفذی بود، سرعت بارگذاری تناوبی باید به‌طریقی انتخاب می‌گردید که از یکسان بودن فشار آب منفذی در ارتفاع نمونه در هنگام بارگذاری اطمینان حاصل شود. به این منظور، نمونه‌ها با سرعتهای مختلف بارگذاری مورد آزمایش قرار گرفتند و سپس در مراحل مختلف آزمایش، بارگذاری متوقف و تغییرات فشار آب منفذی حداقل برای ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. با توجه به این روند، در آزمایشهای سه محوری تناوبی، فرکانس بارگذاری ۰/۰۵ هرتز انتخاب گردید.

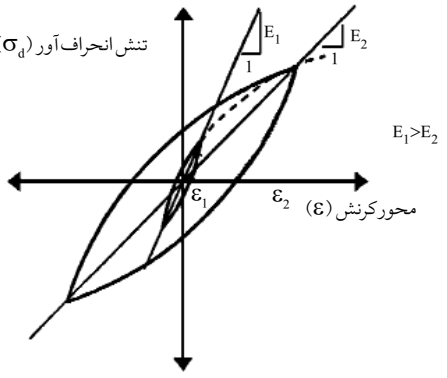
آزمایشهای سه محوری تناوبی کنترل کرنش و کنترل تنش در دامنه‌های مختلف بر روی هر نمونه انجام گردید. تمام آزمایشهای سه محوری تناوبی انجام شده در این تحقیق بر مبنای استاندارد ASTM D3999 [۴] انجام پذیرفت.

۴ - تأثیر حجم درشت دانه‌ها بر مدول برشی مصالح مخلوط

مدول برشی از مهمترین خواص تغییرشکل دینامیکی خاک می‌باشد که در تحلیل‌های دینامیکی کاربرد وسیعی دارد و تغییرات آن به عواملی نظیر سطح کرنش برشی در نمونه و حتی تعداد چرخه‌های بارگذاری بستگی دارد. در شکل (۲) و رابطه (۱) نحوه محاسبه مدول برشی مطابق استاندارد ASTM D3999 ارائه شده است [۴]:

$$G=\frac{E}{2(1+\upsilon)} \qquad (1)$$

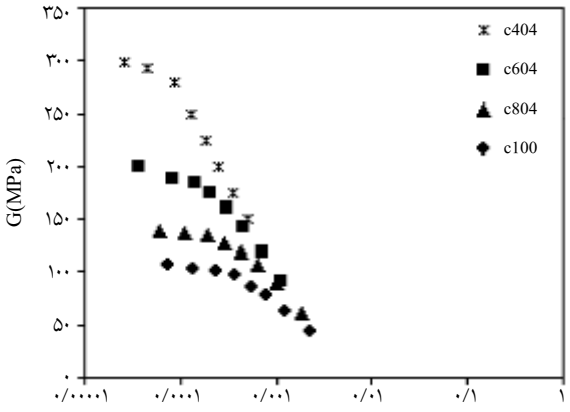
در رابطه (۱)، G مدول برشی، E مدول یانگ و υ ضریب پواسون می‌باشد که برای بارگذاری در شرایط زهکشی نشده برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.



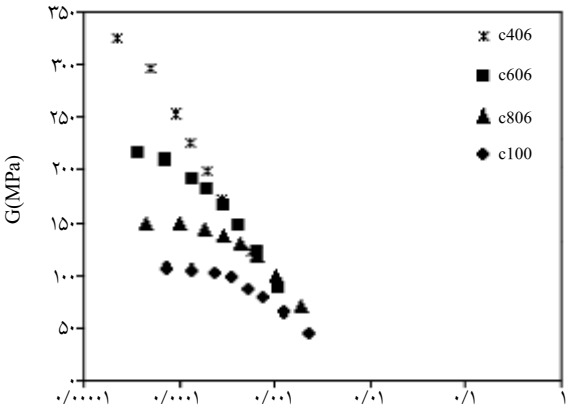
شکل (۲): نحوه تعیین مدول برشی در بارگذاری تناوبی

تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش برشی در آزمایشهای کنترل تنش برای ترکیبات مختلف رس ـ دانه‌های سرامیکی در چرخه دهم بارگذاری در شکل (۳) نشان داده شده‌است (رفتار در سایر چرخه‌ها مشابه است). این شکل مبیّن آن است که بدون

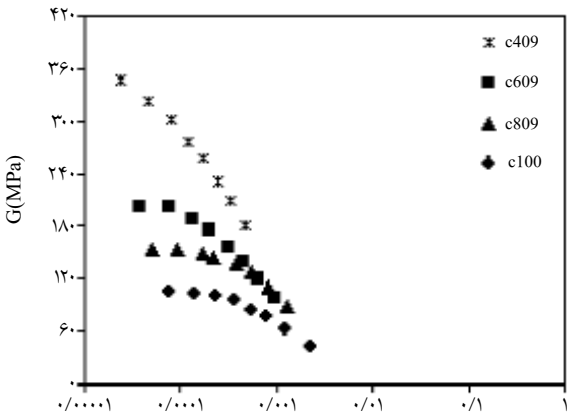
درنظر گرفتن اندازه دانه‌های سرامیکی، در تمام ترکیبات با افزایش درصد حجمی درشت‌دانه‌ها، مدول برشی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که نمونه‌های C404، C406 و C409، بیشترین مقادیر مدول برشی و نمونه C100 کمترین مقدار مدول برشی را دارند. نظر به صلبیت دانه‌های سرامیکی، افزایش مدول برشی با افزایش حجم دانه‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد. با دقت به شکل (۳) می‌توان استنباط نمود که با افزایش حجم دانه‌ها، مدول برشی با سرعت بیشتری، با افزایش کرنش، کاهش می‌یابد. به منظور کمّی کردن این موضوع، در شکل (۴) تغییرات مدول برشی تراز شده G/G_{MAX}، برای ترکیبات مختلف در چرخه دهم بارگذاری رسم



الف: کرنش برشی

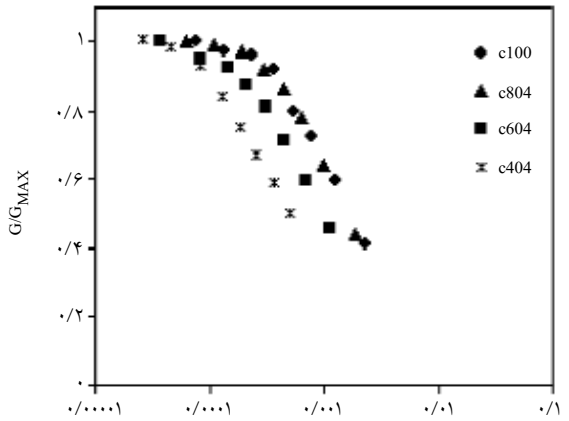


ب: کرنش برشی

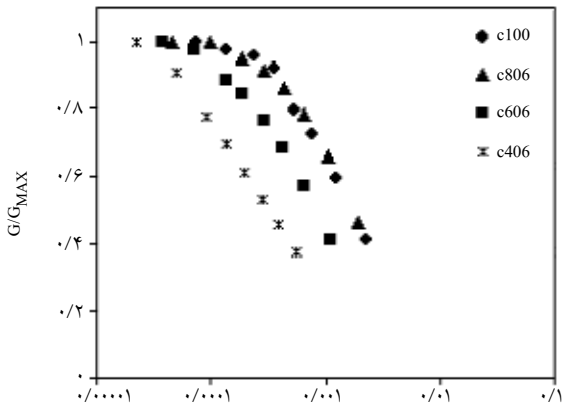


پ: کرنش برشی

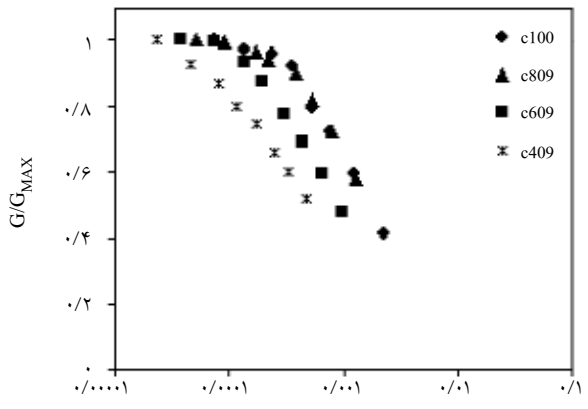
شکل (۳): تأثیر حجم درشت دانه‌ها بر مدول برشی در آزمایشهای کنترل تنش (دور دهم بارگذاری)



الف: کرنش برشی



ب: کرنش برشی



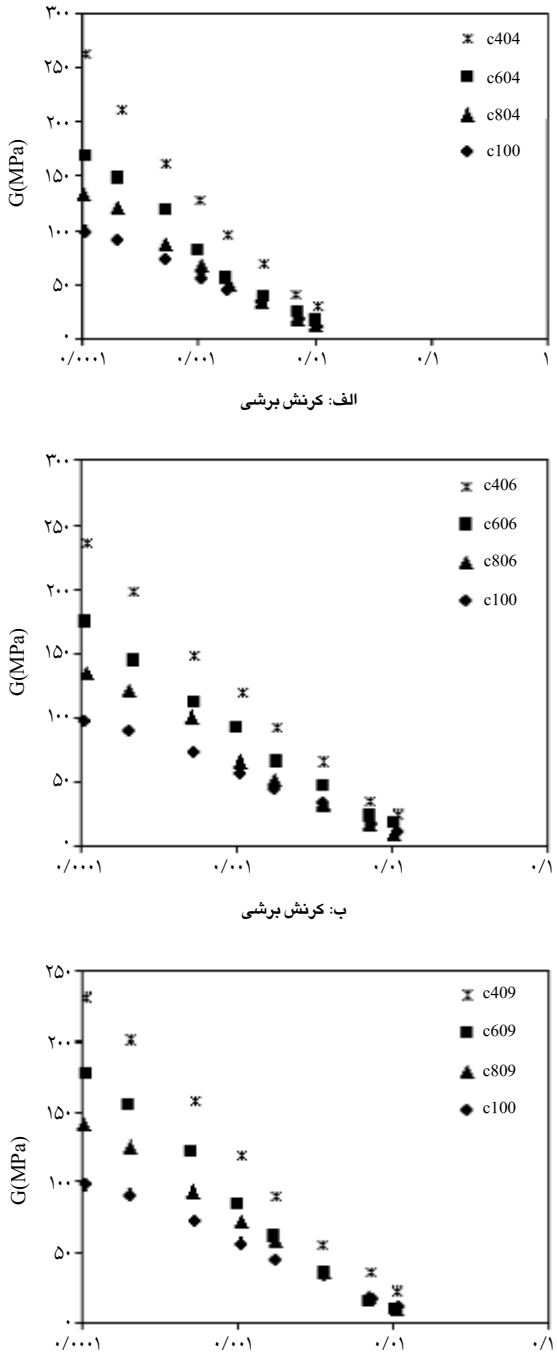
پ: کرنش برشی

شکل(۴): تأثیر حجم درشت دانه‌ها بر مدول برشی تراز شده

شده‌است(G_{MAX} حداکثر مدول برشی در آزمایشهای کنترل تنش است)؛ چنانکه ملاحظه می‌گردد با افزایش حجم دانه‌ها، مقدار G/G_{MAX} کاهش می‌یابد. اگر افزایش حجم دانه‌ها، متناظر با کاهش خواص خمیری مصالح درنظر گرفته‌شود، نتایج نشان داده‌شده درشکل (۴) در تطابق کامل با مطالعات وستیک و دوبری است [۵] که نشان دادند با کاهش نشانه خمیری مصالح، G/G_{MAX} مصالح نیز کاهش می‌یابد.

تغییرات مدول برشی برحسب کرنش برشی در آزمایشهای کنترل کرنش برای ترکیبات مختلف رس ـ دانه‌های سرامیکی در چرخه دهم بارگذاری در شکل (۵) نشان داده شده‌است (رفتار در سایر چرخه‌ها مشابه است). شکل مذکور مبیّن آن است که همانند آزمایشهای کنترل تنش مستقل از اندازه دانه‌های سرامیکی، در تمام ترکیبات، با افزایش درصد حجمی دانه‌ها، مدول برشی افزایش می‌یابد و عموماً با افزایش حجم دانه‌ها، مدول برشی با سرعت بیشتری با افزایش کرنش کاهش می‌یابد.

نکته قابل ذکر درشکل (۵)، در مقایسه با شکل (۳) این است که در آزمایشهای کنترل تنش نسبت به آزمایشهای کنترل کرنش، کرنشهای کمتری را می‌توان در نمونه ایجاد نمود. دلیل این موضوع نوع سیستم بارگذاری (از نوع بادی) و دقت وسایل اندازه‌گیری است. دستگاه سه محوری تناوبی مورد استفاده (مدل DTC384 EP ساخت شرکت Seiken) در آزمایشهای کنترل تنش، قادر به کنترل بر روی بارهایی به دامنه حداقل ۱ تا ۲ کیلوگرم می‌باشد که متعاقباً در نمونه‌های سخت، کرنشهایی در حدود ۲×۱۰^{-۵} ایجاد می‌کند که با وجود حسگرهای غیرتماسی، این مقدار کرنش، قابل اندازه‌گیری می‌باشد. از طرف دیگر، در آزمایشهای کنترل کرنش حداقل تغییرمکانی را که می‌توان با کنترل مناسب به نمونه اعمال نمود، در حد صدم میلیمتر می‌باشد که در نمونه‌های به ارتفاع ۱۴۰ میلیمتر این تحقیق، کرنشهایی در حدود $۱/۵\times۱۰^{-۴}$ ایجاد می‌نماید.



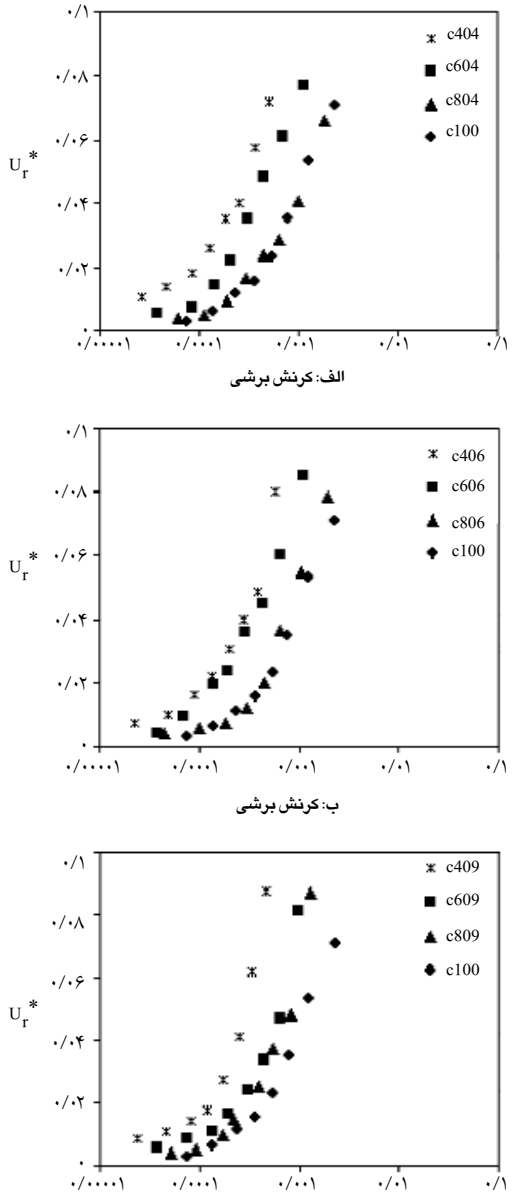
شکل (۵): تأثیر حجم دانه‌ها بر مدول برشی در آزمایشهای کنترل کرنش (چرخه دهم بارگذاری)

۵ - تأثیر حجم دانه‌ها بر فشار آب منفذی

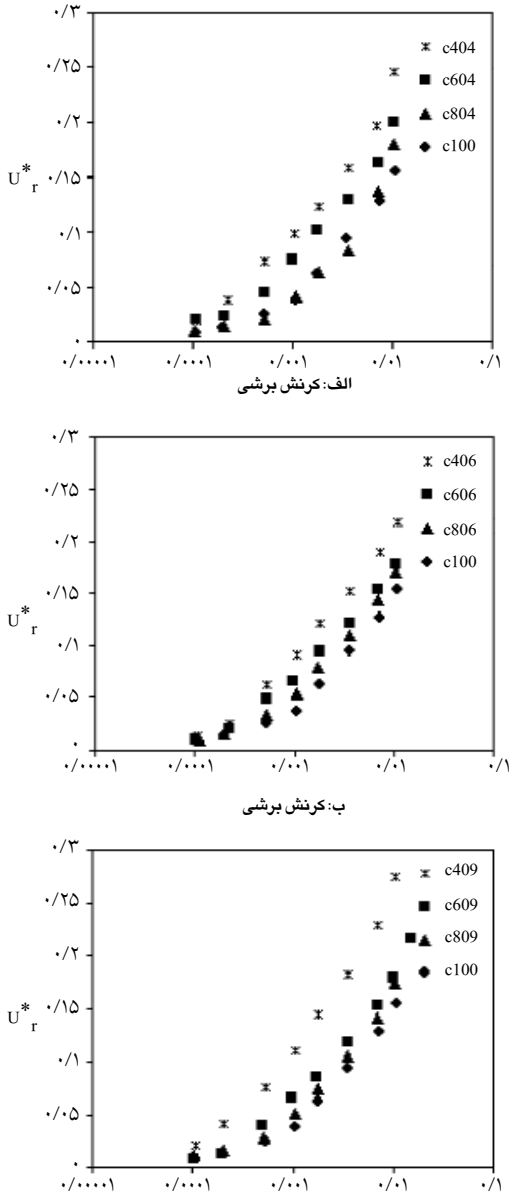
تغییرات فشار آب منفذی در انواع ترکیبات رسهای مخلوط

در چرخه دهم از بارگذاریهای کنترل تنش در شکل (۶) نشان داده شده‌است (رفتار در سایر چرخه‌ها مشابه است). در این شکل، U_r^* فشار آب منفذی تراز شده به تنش همه جانبه اولیه می‌باشد و در لحظه‌ای محاسبه می‌گردد که در بارگذاری تناوبی کنترل تنش، مقدار تنش انحراف آور صفر می‌گردد. شکل مذکور مبیّن آن است که، هر چند فشار آب منفذی کمی در محدوده کرنشهای به‌دست آمده، ایجاد می‌گردد، لیکن تأثیر درصد حجمی بخش دانه‌ای بر فشار آب منفذی مشهود است؛ به‌طوری که با افزایش حجم دانه‌ها (به‌دلیل افزایش کرنش بخش رسی در یک کرنش کل ثابت)، U_r^* افزایش می‌یابد.

شکل (۷) نشان‌دهنده تغییرات فشار آب منفذی در انواع ترکیبات رسهای مخلوط در چرخه دهم از بارگذاریهای کنترل کرنش است. در این شکل، U_r^* فشار آب منفذی تراز شده به تنش همه جانبه اولیه است و جایی محاسبه می‌گردد که در بارگذاری تناوبی کنترل کرنش، مقدار کرنش اعمالی صفر می‌شود؛ چنانکه مشاهده می‌گردد با افزایش درصد حجمی دانه‌ها، فشار آب منفذی افزایش می‌یابد.



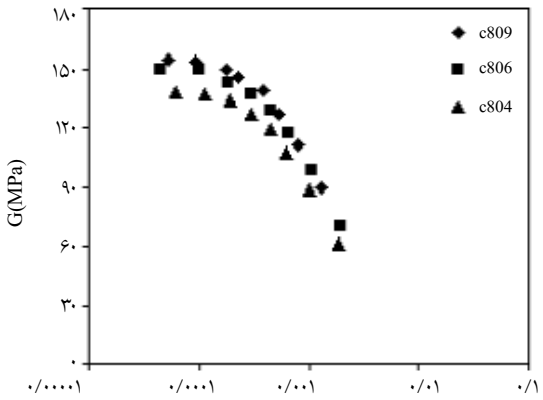
شکل (۶): تأثیر حجم دانه‌ها بر فشار آب منفذی در آزمایشهای کنترل تنش (چرخه دهم)



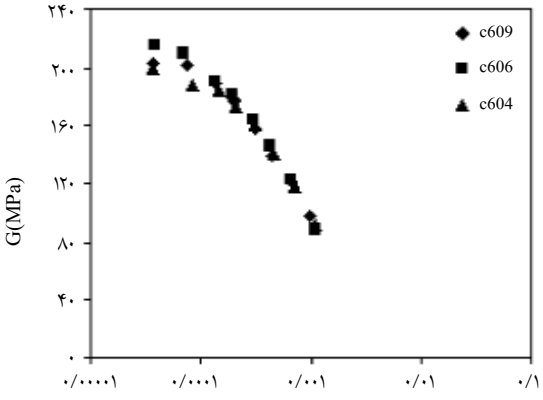
شکل (۷): تأثیر حجم دانه‌ها به فشار آب منفذی در آزمایشهای کنترل کرنش (چرخه دهم)

۶ ـ تأثیر سطح دانه‌ها بر مدول برشی و فشار آب منفذی

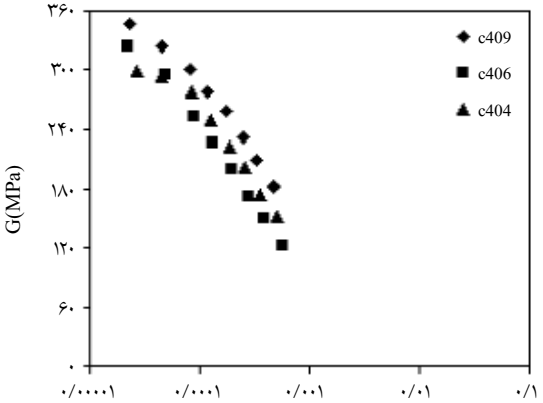
تأثیر سطح (اندازه) دانه‌ها بر مدول برشی و فشار آب منفذی در آزمایشهای کنترل تنش و کنترل کرنش در چرخه دهم بارگذاری در شکلهای (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند (رفتار در سایر چرخه‌های بارگذاری مشابه است)؛ چنانکه مشاهده می‌شود غیر از کرنشهای کم (حدود ۲×۱۰^{-۳}) که مدول برشی در نمونه‌های حاوی دانه‌های ۴ میلیمتر کوچکتر از سایر نمونه‌هاست، عملاً سطح (اندازه) دانه‌ها تأثیری بر مدول برشی و فشار آب منفذی مصالح مخلوط ندارد. شایان ذکر است که در حجم ثابت از دانه‌ها، سطح دانه‌های



الف: کرنش برشی

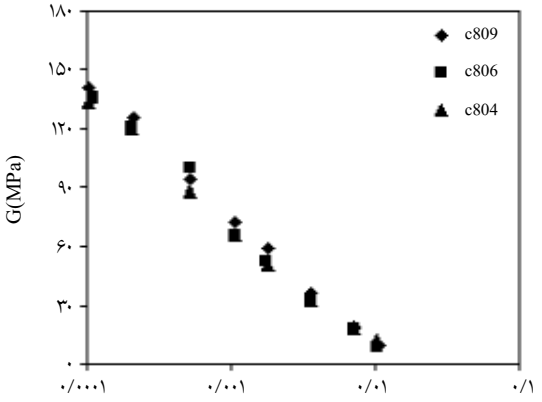


ب: کرنش برشی

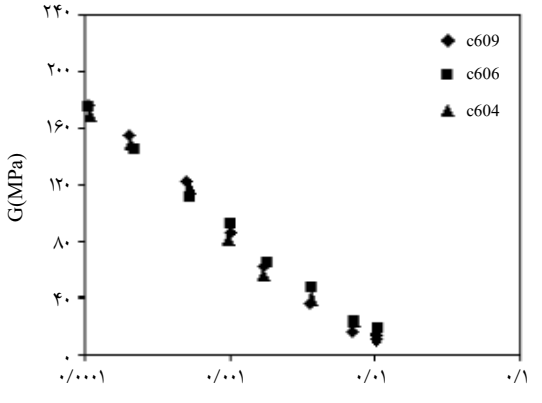


پ: کرنش برشی

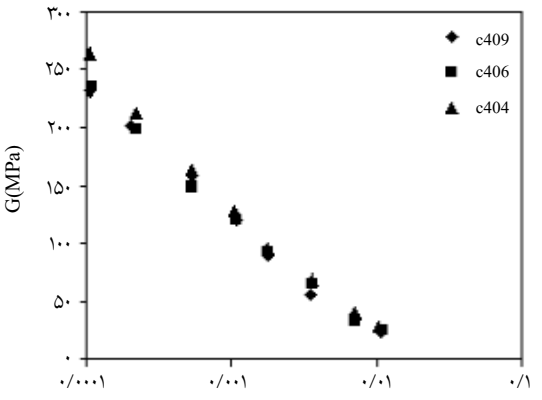
شکل (۸): تأثیر سطح دانه‌ها بر مدول برشی در آزمایشهای کنترل تنش (چرخه دهم)



الف: کرنش برشی



ب: کرنش برشی

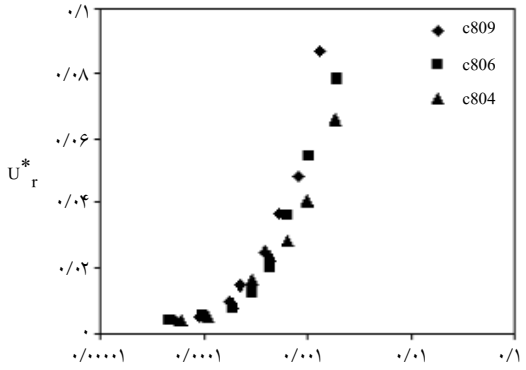


پ: کرنش برشی

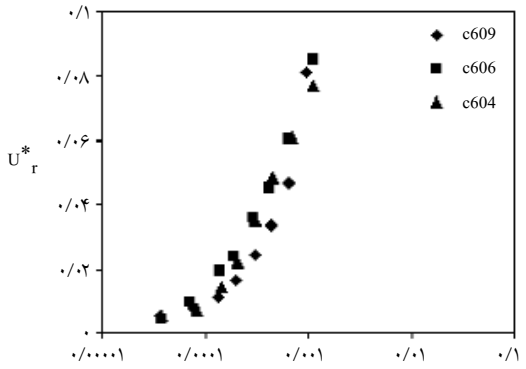
شکل (۹): تأثیر سطح دانه‌ها بر مدول برشی در آزمایشهای کنترل کرنش (چرخه دهم)

۴ میلیمتر ۱/۵ برابر سطح دانه‌های ۶ میلیمتری و ۲/۲۵ برابر سطح دانه‌های ۹ میلیمتری است.

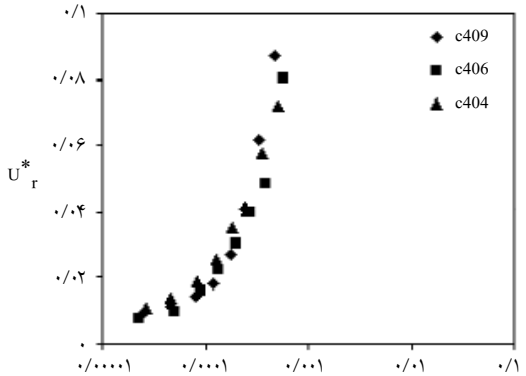
شکلهای (۱۰) و (۱۱) نیز نشان دهنده تأثیر اندازه سطح دانه‌ها بر فشار آب منفذی در چرخه دهم بارگذاری می‌باشد؛ چنانکه مشاهده می‌گردد، سطح دانه‌ها بر تغییرات فشار آب منفذی در مصالح مخلوط عملاً تأثیری ندارد.



الف: کرنش برشی

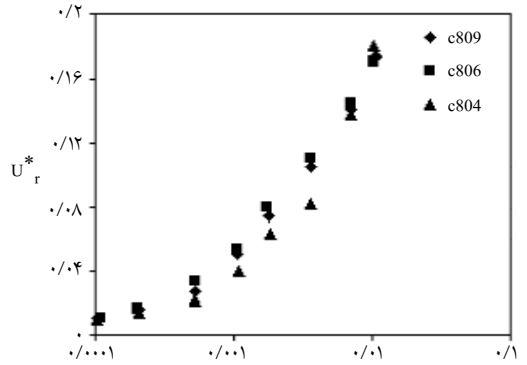


ب: کرنش برشی

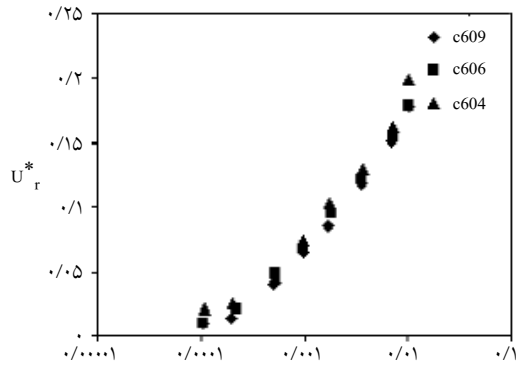


پ: کرنش برشی

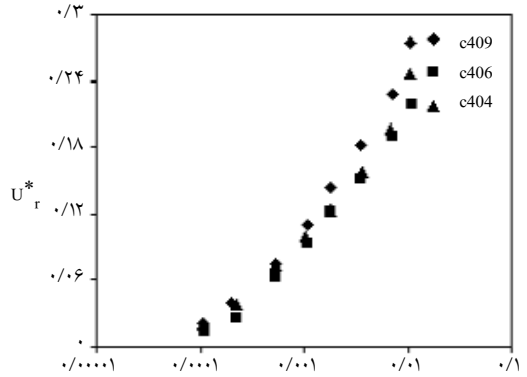
شکل (۱۰): تأثیر سطح دانه‌ها بر فشار آب منفذی در آزمایشهای کنترل تنش (چرخه دهم)



الف: کرنش برشی



ب: کرنش برشی



پ: کرنش برشی

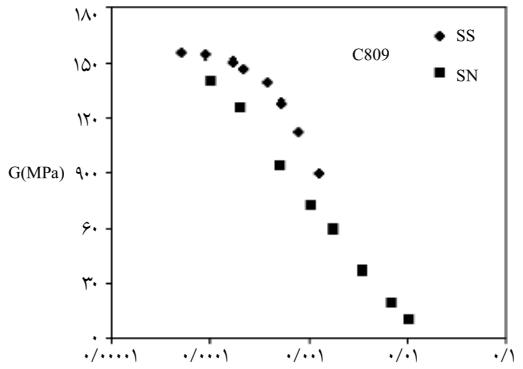
شکل (۱۱): تأثیر سطح دانه‌ها بر فشار آب منفذی در آزمایشهای کنترل کرنش (چرخه دهم)

۷ - تأثیر چرخه مسیر بارگذاری بر مدول برشی

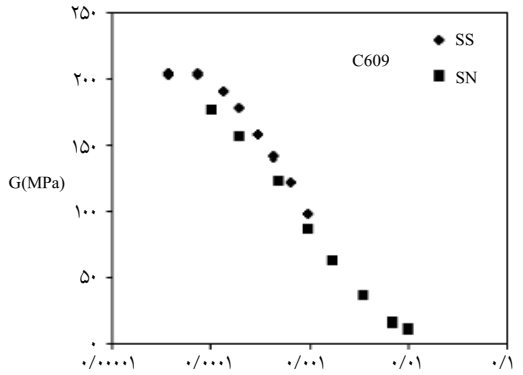
باید توجه داشت که در عمل، هیچ تضمینی وجود ندارد که بارها کاملاً به‌صورت کنترل کرنش یا کنترل تنش اعمال گردند. با توجه به این ملاحظات و نظر به اینکه در آزمایشهای استاتیکی امکان بارگذاری کنترل تنش وجود نداشت، به‌منظور بررسی تأثیر مسیر بارگذاری بر روی رفتار مصالح مخلوط

چسبنده، هم آزمونهای سه‌محوری تناوبی کنترل کرنش و هم‌کنترل تنش بر روی هر ۱۰ نمونه انجام گرفت.

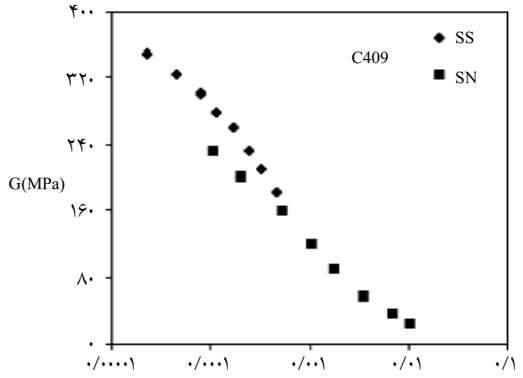
نمودارهای تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش برشی در آزمایشهای کنترل کرنش و کنترل تنش برای نمونه‌های مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گرددکه مسیر بارگذاری بر مدول برشی تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که مدول برشی به‌دست آمده از آزمایشهای کنترل



الف: کرنش برشی



ب: کرنش برشی



پ: کرنش برشی

شکل (۱۲): تأثیر مسیر بارگذاری برمدول برشی در نمونه‌های ۲۰٪ دانه

تنش به‌مراتب بیش از مقدار آن در آزمایشهای کنترل کرنش است. علاوه‌بر این، با افزایش درصد حجمی بخش دانه‌ای این اختلاف کاهش می‌یابد.

با توجه به روند تغییرات مدول برشی بر حسب کرنش در آزمایشهای کنترل تنش و کنترل کرنش و اینکه قاعدتاً حداکثر مدول برشی مصالح (که در ناحیه الاستیک تعیین می‌شود) باید مستقل از نوع آزمایش (کنترل تنش یا کنترل کرنش) باشد، به‌نظر می‌رسد که در بارگذاریهای کنترل کرنش نسبت به بارگذاریهای کنترل تنش، مصالح مخلوط سریعتر (در کرنشهای کمتری) وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند. این پدیده، با کاهش درصد حجمی دانه‌ها تشدید می‌شود.

۸ ـ نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی تأثیر حجم و سطح دانه‌ها بر مدول برشی و فشار آب منفذی در رسهای مخلوط انجام گردید. به‌این منظور، ازگویهای کروی سرامیکی به قطرهای ۴، ۶ و ۹ میلیمتری به‌عنوان بخش دانه‌ای مصالح استفاده گردید. علاوه‌برآن، نمونه‌هایی از رس لاغر و ترکیب ۸۰٪ رس با ۲۰٪ دانه، ۶۰٪ رس با ۴۰٪ دانه و ۴۰٪ رس با ۶۰٪ دانه به‌صورت متراکم تهیه و در تنش همه جانبه ۳۵۰کیلوپاسکال برای آزمایشهای سه محوری تناوبی کنترل تنش وکرنش، تحکیم و مورد آزمایش قرار گرفتند. بدیهی است در حجم ثابت از دانه‌ها، سطح دانه‌های ۴ میلیمتری ۱/۵ برابر سطح دانه‌های ۶ میلیمتری و ۲/۲۵ برابر سطح دانه‌های ۹ میلیمتری است.

مهمترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیق عبارتند از:

۱ـ باافزایش درصد حجمی دانه‌ها، مدول برشی افزایش می‌یابد؛

۲ـ با افزایش حجم دانه‌ها، مدول برشی با سرعت بیشتری با افزایش کرنش کاهش می‌یابد؛

۳ ـ افـــزایش حجـــم دانـــه‌هـا سبب افـــزایـش فشار آب منفـذی می‌شود.

۴ ـ برای انواع انـدازه‌های دانه مورد استفـاده در ایـن تحقیق عملاً سطح دانـه‌ها تأثیر قابل‌توجهـی بر مدول برشی و فشار آب منفذی ندارد.

۵ ـ مسیر بارگذاری بر رفتار مصالح مخلوط تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که مدول برشی به‌دست آمده از آزمایشهای کنتـرل تنش به‌مراتب بیش از مقـدار آن در آزمایشهـای کنتـــرل کـرنش است. با افـــزایش حجـم دانه‌ها، ایـــن اختـلاف کـاهش می‌یابـــد. به‌نظـــر می‌رسد کـــه در بارگذاریهای کنترل کرنش نسبت به بارگذاریهای کنترل تنش، نمونه‌ها سریعتر (در کرنشهای کمتری) وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند.

۹ ـ مراجع

1.International Commission on Large Dams (ICOLD). (1989). Moraine as embankment and foundation material. *Bulletin 69.* Paris, France: ICOlD.

2.Jafari, M.K., Shafiee, A. (2004). Mechanical behavior of compacted composite clays. *Canadian Geotechnical Journal, 41,* 1152-1167.

۳. شفیعـی، علی؛ جعفـری، محمدکاظـم. (۱۳۸۵). بـررسی مشخصات تغییـرشکل تناوبـی مصالـح مخلـوط متـراکم کائـولن ـ شن. ژورنال زلزله‌شناسی و مهنـدسی زلزلـه، جلد هشتم، شماره دوم، صفحات ۸۱ تا ۹۳.

4.ASTM. (1999). Standard test method for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus (D3999-91). *In ASTM Annual Book of Standards.* Philadelphia, Pa:American Society for Testing and Materials.

5.Vucetic, M., Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering,* 117, 89-107.